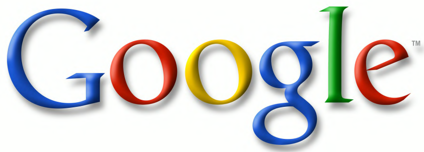
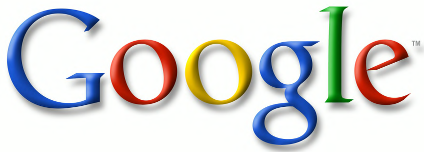
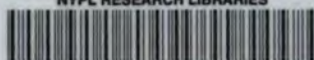

Google


Google





Konstruktion und Berechnung

Ein- und Mehrphasiger

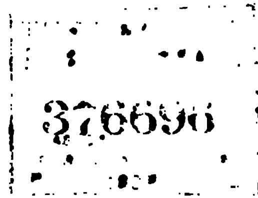
Wechselstromgeneratoren

Von

Heinr. Birven
Ingenieur
Dozent an der Gewerbe-Akademie Berlin



Leipzig
Verlag von Hachmeister & Thal
1906



Vorwort.

Bei der großen Bedeutung, welche in neuerer Zeit der Wechselstrom für elektrische Kraft-Anlagen und Übertragungen gewonnen hat, ist es für den Studierenden notwendig geworden, sich mit den zur Erzeugung von Wechselstrom dienenden Maschinen, den Wechselstromgeneratoren, in eingehenderer Weise, sowohl hinsichtlich der Theorie als auch der Konstruktion und Berechnung, vertraut zu machen, als dies bis vor kurzem der Fall war.

In dem die Theorie der Wechseltromgeneratoren behandelnden Teil hat sich der Verfasser bemüht, die Wirkungsweise und das Verhalten derselben in möglichst einfacher Weise soweit vorzutragen, als dies für den Studierenden und jüngeren Ingenieur erforderlich ist. In dem konstruktiven Teile sind die hauptsächlichsten Details der Wechselstrommaschinen in kurzer, übersichtlicher Weise zusammengestellt. Den dritten Teil, enthaltend die Berechnung der Wechselstrommaschinen, glaubte der Verfasser ausführlicher behandeln zu müssen, einerseits, um die Anwendung der Formeln zu zeigen, andererseits, um den Studierenden überhaupt in das elektrotechnische Rechnen einzuführen.

Gegenüber der neuerdings aufkommenden Bezeichnung „Synchronmaschinen" glaubt der Verfasser die ältere und natürlichere Bezeichnung „Wechselstromgeneratoren" beibehalten zu müssen, da jene systematisch zwar sehr gut getroffen, in bezug auf das allgemeine Verständnis aber weniger geboten erscheint.

Durch Überlassung von Zeichnungen usw. haben mehrere elektrotechnische Firmen den Verfasser in dankenswerter Weise unterstützt. Gleichzeitig sei auch an dieser Stelle der Verlagsbuchhandlung für die würdige Ausstattung des Buches der Dank des Verfassers ausgesprochen.

Berlin, August 1906.

Henri Birven.

Inhaltsverzeichnis.

Seite

Kapitel I.

Allgemeine Einleitungen. Die Wechselstromwickelungen und ihre elektromotorische Kraft.

1. Das Induktionsgesetz 1
2. Die elektromotorische Kraft als Momentanwert, Mittelwert und Effektivwert 2
3. Der Mittelwert und der Effektivwert einer Wechselstrommaschine mit sinusförmigem Feld 4
4. Die elektromotorische Kraft bei nicht sinoidalem Verlauf . . . 5
5. Die Wechselstromwickelungen 6
6. Die elektromotorische Kraft für die verschiedenen Wechselstromwickelungen 19
7. Die Schaltung der Spulen 21
8. Das Verwendungsgebiet der verschiedenen Wechselstromkurven 22
9. Die Magnetsysteme der Wechselstrommaschinen 22
10. Diagramme der Wechselstrommaschinen 23
11. Experimentelle Bestimmung der Ankerrückwirkung und Ankerstreuung 27
12. Berechnung der Gegenampèrewindungen 29
13. Vorausbestimmung des Spannungsabfalles der Maschine . . . 31

Kapitel II.

Die magnetischen Verhältnisse und die Erregung der Wechselstrommaschinen.

14. Bestimmung der Erregung bei variabler Belastung und variabler Phasenverschiebung 31
15. Konstruktion der dynamischen Charakteristik aus der statischen mit Berücksichtigung der Phasenverschiebung 32
16. Die Streuung der Feldmagnete 33
17. Die Erregung der Wechselstrommaschinen 35
18. Die Regulierung der Maschinenspannung 38

Kapitel III.

Das Arbeiten mehrerer Wechselstrommaschinen auf denselben Stromkreis.

19. Die Wechselstrommaschine mit konstanter Klemmspannung bei variabler Erregung 42

20. Das Parallelarbeiten 47
21. Die synchronisierende Kraft 49
22. Das Parallelschalten 51
23. Das Pendeln der Wechselstrommaschinen 52
24. Der Antrieb der Wechselstrommaschinen 55

Kapitel IV.

Leistung, Effektverluste und Erwärmung der Wechselstrommaschinen.

25. Leistung der Wechselstrommaschinen 55
26. Effektverluste in den Wechselstrommaschinen 57
27. Wirkungsgrad der Maschinen 60
28. Erwärmung 61

Kapitel V.

Die Details der Wechselstrommaschinen.

29. Der Anker 62
30. Die Pole 65
31. Verschiedene Ausführungsarten 67
32. Berechnung der Welle. Die Festigkeitsberechnung des Magnetrades. 76

Kapitel VI.

Berechnung von Ein- und Mehrphasigen Wechselstromgeneratoren.

33. Zweckmäßiger Gang der Berechnung 79
34. Berechnung eines Einphasengenerators für 150 K.W. 81
35. Einphasengenerator der Firma Broischi, Finzi & Co., Mailand . 92
36. Berechnung eines Drehstromgenerators 99
37. Drehstromgenerator der vereinigten Elektrizitätsgesellschaft, Wien. 109
38. 350 K.W. Drehstromgenerator der Deutschen Elektrizitätswerke, Aachen 109

Sachregister.

(Die Zahlen beziehen sich auf die Seiten.)

Ampèrewindungen der Magnete 26; 31
— des Ankers 27; 29
Ankerbreite 65
Ankerdurchmesser 65
Ankerkonstruktion 62
Ankerrückwirkung 27; 29
Ankerstreuung 27; 30
Ankerwickelungen 6 u. ff.
Antrieb 55
Arme des Magnetrades 77
Ausgleichstrom 50
Außenpoltype 23; 67

Bandagen 64
Berechnung von Wechselstrommaschinen 79 u. ff.
Bleche 62
Bogenwickelung 18
Broischi, Finzi & Co. 92
Bürstenreibung 60

Charakteristik, statische 32
— dynamische 32
Compoundierung 39

Deutsche Elektrizitätswerke, Aachen 72
Diagramme der Wechselstrommasch. 23
Dreiphasenwickelung 10; 14 u. ff.

Effektive elektromotorische Kraft 4
Effektverluste 57
Einphasenmaschinen 81
Einphasenwickelungen 17
Eisenverluste 59
Elektromotorische Kraft 2
— Kurvenformen 6
— Berechnung derselben 2 u. ff.; 19
Erregermaschine 35
Erregung, Systeme der 35
— Verluste in der 60
Erwärmung 61

Faradays Schwimmerregel 1
Fingerregel 2
Formfaktor 4
Frequenz 4

Gegenampèrewindungen 29
Geschwindigkeit 79; 67
Gleichpoltype 22

Hysteresisverluste, Tabelle des Hysteresisverlustes 59
— Abhängigkeit der Hysteresis von der Induktion 59

Induktion, Wahl derselben 66
Induktionsgesetz 1
Induktive Belastung 25
Induktiver Spannungsabfall 23
Induktortype 22
Innenpolmaschine 22
Interferenzschwingungen 53

Kappsches Diagramm 25
Klemmenspannung 23
Konstante Spannung 38
Kuppelung, direkte 55
Kurvenform der elektromotor. Kraft 6
Kurzschlußstrom 48

Lagerreibung 77
Lammesche Wickelung 19
Leblancsche Amortiseurwickelung 54
Leerlaufspannung 25
Leistung der Maschine 55
Leistungsfaktor 55
Luftzwischenraum 66

Magnetsysteme 22
Magnetpole 30
Magnetrad, Ausbildung desselben 72
— Festigkeitsberechnung desselben 77
Mantelwickelung 16
Mehrphasenwickelungen 8 u. ff.
Mittlere elektromotorische Kraft 2
Monocyklisches System 11
Mordey 23

Nuten, Formen der a[illegible]
— Berechn. u. Di[illegible]

Ohm'scher Spannungsabfall 23
Ohm'sche Verluste 57

Parallelarbeiten 42 u. ff.; 47
Parallelschalten 51
Parshal 79
Pendeln 52
Periodenzahl 80
Phasenlampen 51
Phasenverschiebung 55
Phasenvoltmeter 51
Polbreite 81
Polteilung 81; 20

Querschnitt, Dimensionierung des Ankerquerschnitts 84
— des Magnetquerschnitts usw. 85

Radspeichen 77
Regulatoren der Dampfmaschinen 55
Resonanz 53
Riemenantrieb 55

Schaltung der Spulen 22
Schleifenwickelung 12
Schleifringe 76
Schwingungsdauer 53
Schwungmoment 67
Schwungrad 72
Seilantrieb 55
Selbsterregung 35
Selbstinduktionskoeffizient 25
Siemens und Schuckert-Werke 67 u. ff.
Sinuskurve 3
Spannung 2; 19
Spannungsabfall 24; 31
Spannungskurven 6
Spannungskoeffizienten 6
Stabwickelung 16
Steinmetz 58
Streuung der Magnete 33
des Ankers 26; 27
Streuungskoeffizient 87
Stromdichte im Anker 62
— in der Magnetwickelung 86
— an den Schleifbürsten 62
Stromstärke 57
Synchronisierende Kraft 47 u. ff. 49
Synchronismus 47 u. ff.

Temperatur 61
Tourenzahl 80
Turbinen 55; 67
Typen von Wechselstrommasch. 67; 22

Übergangswiderstand 62
Übertemperatur 61
Umfangsgeschwindigkeit 67
Ungleichförmigkeitsgrad 75
Unterbrechung von Stromkreisen mit hoher Induktanz 42

Vectordiagramm 8
Ventilation 62
Verluste im Anker 57; 60
— in den Magneten 60
V-Kurve 47

Wechselpoltype 22
Wechselstrommaschinen, Beispiele 67
Welle, Berechnung der 76
Wellenwickelung 12; 16
Wickelungen 6 u. ff.
Widerstand bei Wechselstrom 57
Winkelgeschwindigkeit 8
Wirbelströme 59
Wirkungsgrad 60

Zackenanker 7
Zähne 65
Zusammensetzung v. elektromotorischen Kräften 8
Zusatztransformator 39 u. ff.
Zweiphasenmaschinen 8
Zweiphasenwickelungen 8

Kap. I.

Allgemeine Einleitungen. Die Wechselstromwickelungen und ihre elektromotorische Kraft.

1. Das Induktionsgesetz.

Ändert sich in einem magnetischen Felde die Kraftlinienzahl N, welche einen Leiter durchsetzt, in der unendlich kleinen Zeit d t um den Betrag d N, so wird hierdurch in dem Leiter eine elektromotorische Kraft induziert von der Größe:

$$E = -\frac{dN}{dt}.$$

In Worten besagt dies: Die induzierte elektromotorische Kraft ist gleich dem negativen Differentialquotienten der Kraftlinienänderung nach der Zeit der Änderung.

Ein von dieser elektromotorischen Kraft in einem Ohm'schen Widerstande w geschaffener Strom: $i = \frac{E}{w}$ ist dann so gerichtet, daß seine Kraftlinien der Änderung von N entgegenwirken. Nehmen die Kraftlinien N bei der Änderung zu, so suchen die Kraftlinien des Stromes i durch ihr Entgegenwirken die ursprüngliche Zahl N zu erhalten; nimmt N ab, so haben die Stromkraftlinien wiederum das Bestreben, die ursprüngliche Zahl N unverändert zu erhalten.

Diese Verhältnisse werden durch das Lenz'sche Gesetz bestimmt, welches besagt: Der induzierte Strom hat stets eine solche Richtung, daß seine Kraftlinien einer Änderung des Kraftlinienfeldes entgegenwirken.

Die Richtung der induzierten elektromotorischen Kraft läßt sich nunmehr in einfacher Weise aus der Faraday'schen Schwimmerregel bestimmen: Man schwimmt in der Richtung der Kraftlinien, sieht nach der Bewegungsrichtung des Leiters, so zeigt die induzierte elektromotorische Kraft nach rechts.

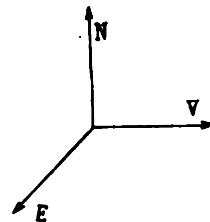


Fig. 1.

Graphisch läßt sich diese Regel in die Form eines räumlichen Koordinatensystems bringen, dessen Koordinaten die Kraftlinienrichtung N, die Bewegungsrichtung V und die Richtung der elektromotorischen Kraft E bilden und zwar (Fig. 1):

y-Achse	Richtung N,
x-Achse	„ V,
z-Achse	„ E.

Bildet man sich ein solches Koordinatensystem mit Hilfe der ersten 3 Finger der rechten Hand, wobei der Zeigefinger die Richtung der Kraftlinien, der Daumen die Bewegungsrichtung vertritt, so gibt der Mittelfinger die Richtung der induzierten elektromotorischen Kraft an.

2. Die elektromotorische Kraft als Momentanwert, Mittelwert und Effektivwert.

Die Grundgleichung für eine induzierte elektromotorische Kraft lautet:

$$E = H \cdot l \cdot v \cdot 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Darin bezeichnet:

H Die Feldstärke.
l Die induzierte Drahtlänge in cm.
v Die Schnittgeschwindigkeit in cm sek.

Wird nun ein vollständig homogenes Kraftlinienfeld vorausgesetzt (Fig. 2) und bezeichnet ferner:

D den Ankerdurchmesser in cm,
b die Ankerlänge „ „
c die Umfangsgeschwindigkeit des Ankers in cm sek.
z die Anzahl der hintereinander geschalteten Drähte.
n die Tourenzahl pro Minute.

so ist, da $l = b \cdot z$ und $c = \frac{D \cdot \pi \cdot n}{60}$:

$$E = H \cdot b \cdot z \cdot c \cdot \sin \alpha \cdot 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Fig. 2.

α ist hierin der Winkel, den die Spule mit der Nullage einnimmt. Als Schnittgeschwindigkeit v kommt nur die senkrecht zu den Kraftlinien gerichtete Komponente der Umfangsgeschwindigkeit: $v = c \cdot \sin \alpha$ in Betracht.

Ferner wird:

$$E = H \cdot b \cdot z \cdot \frac{D \cdot \pi \cdot n}{60} \cdot \sin \alpha \cdot 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Da nun: $H \cdot b \cdot D = N$ = der gesamten, die Spule durchsetzenden Kraftlinienzahl, so resultiert:

$$E = \pi \cdot N \cdot \frac{n}{60} \cdot z \cdot \sin \alpha \cdot 10^{-8} \text{ Volt} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

Die Gleichung 1 stellt uns den Momentanwert der elektromotorischen Kraft in vollständig homogenem Kraftlinienfelde für den betreffenden Winkel α dar. Aus derselben ergibt sich:

Für $\alpha = 0$ wird $E = 0$

$\alpha = 90°$, $E = \pi \cdot N \cdot \frac{n}{60} \cdot z \cdot 10^{-8} = E_{max}$

$\alpha = 180°$, $E = 0$

$\alpha = 270°$, $E = -E_{max}$

Ganz allgemein gilt also:

$$E = E_{max} \cdot \sin \alpha \quad 2)$$

d. h. **in einem vollständig homogenen Felde ist der Momentanwert der elektromotorischen Kraft eine Sinusfunktion des Drehwinkels α.**

Die Größe der elektromotorischen Kraft läßt sich also in jedem Augenblick durch die zu dem betreffenden Abszissenwert α gehörige Ordinate einer Sinuskurve darstellen. Statt α kann natürlich auch die Zeit t gewählt werden. (Fig. 3 u. 4.)

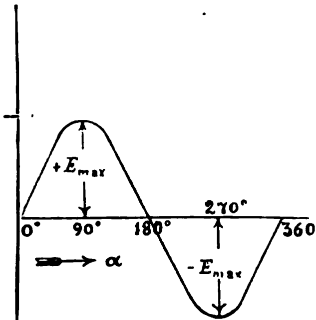


Fig. 3.

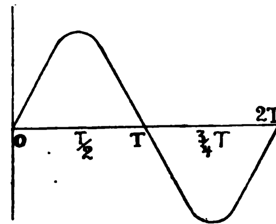


Fig. 4.

Verläuft die elektromotorische Kraft nach einer Sinuskurve, so verläuft im allgemeinen auch der von derselben erzeugte Strom nach einer solchen. Die Zeit, innerhalb welcher der Strom von Null anfangend das positive Maximum, den Nullwert, das negative Maximum bis zum abermaligen Nullwert durchläuft, heißt eine Periode ($T = 2\pi$), die Hälfte dieser Zeit $\frac{T}{2} = \pi$ ein Wechsel.

Aus der Summe der einzelnen Momentanwerte läßt sich nun der algebraische Mittelwert E_m, wie folgt, berechnen (Fig. 5.):

Fig. 5.

Es ist der Inhalt des schraffierten Flächenstreifens:

$$E \cdot d\alpha = E_{max} \cdot \sin\alpha \cdot d\alpha.$$

Also der Flächeninhalt für einen Wechsel:

$$\int_0^\pi E_{max} \cdot \sin\alpha \cdot d\alpha = E_{max} \cdot \int_0^\pi \sin\alpha \cdot d\alpha = 2 \cdot E_{max} \cdot$$

Also wird die mittlere Ordinate, indem man den Inhalt durch die Basis dividiert:

$$E_m = \frac{2}{\pi} \cdot E_{max} = 0{,}637 \cdot E_{max} = \frac{7}{11} \cdot E_{max} \quad . \; . \; . \quad (3)$$

Für die Elektrotechnik ist dieser Wert nur von nebensächlicher Bedeutung. In der Praxis interessiert derjenige Wert, der sich aus der Leistung ergibt.

Um die mittlere Leistung des Wechselstromes zu berechnen, bildet man die Summe der Momentanwerte der Leistung während einer halben

Periode, also von 0 bis π, und dividiert die Summe durch die Basis π. Nun ist der Momentanwert der Leistung gegeben durch:

$$E_{max} \cdot \sin\alpha \cdot i_{max} \cdot \sin\alpha = E_{max} \cdot i_{max} \sin^2\alpha \cdot$$

Also die mittlere Leistung während eines Wechsels:

$$P = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^\pi E_{max} \cdot i_{max} \cdot \sin^2\alpha \cdot d\alpha = \frac{E_{max} \cdot i_{max}}{\pi} \cdot \int_0^\pi \sin^2\alpha \cdot d\alpha \cdot$$

Nun ist: $\int_0^\pi \sin^2\alpha \cdot d\alpha = \left[\frac{\alpha}{2} - \frac{1}{2} \sin\alpha \cdot \cos\alpha\right]_0^\pi = \frac{\pi}{2} \cdot$

Somit: $P = \frac{E_{max} \cdot i_{max}}{\pi} \cdot \frac{\pi}{2} = \frac{E_{max} \cdot i_{max}}{2} = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{i_{max}}{\sqrt{2}} \cdot$ (4)

Dabei bezeichnet man $\frac{E_{max}}{\sqrt{2}} = E$ und $\frac{i_{max}}{\sqrt{2}} = i$ als die Effektivwerte, so daß der Effekt: $P = E \cdot i \cdot$

Es ist:

$$\left.\begin{aligned} E &= 0{,}707 \cdot E_{max} = \frac{7}{10} \cdot E_{max} \\ i &= 0{,}707 \cdot i_{max} = \frac{7}{10} \cdot i_{max} \end{aligned}\right\}$$

Besitzt nun eine Maschine 2 p Pole, so ist in Gl. (1) noch der Faktor p einzuführen, so daß: $E_{mom} = \pi \cdot p \cdot N \cdot \frac{n}{60} \cdot z' \cdot 10^{-8} \cdot \sin\alpha$ Volt.

Der Ausdruck: $\frac{p \cdot n}{60} = \nu$ wird als Periodenzahl bezeichnet, also:

$$E_{mom} = \pi \cdot \nu \cdot N \cdot z' \cdot 10^{-8} \cdot \sin\alpha \text{ Volt.} \quad . \quad . \quad (5)$$

Das Verhältnis zwischen dem effektiven und dem algebraischen Mittelwert einer Kurve $\frac{E}{E_m}$ heißt nach Fleming der „Formfaktor", da dasselbe bestimmend für die Form der Kurve ist.

3. Der Mittelwert und der Effektivwert einer Wechselstrommaschine mit sinusförmigen Feld.

Es bezeichne:
N die von einem Pol ausgehenden Kraftlinien,
z' die Zahl der hintereinander geschalteten, in gleicher Lage befindlichen Drähte,
p die halbe Polzahl,
n die Tourenzahl pro Minute,

so ist die Anzahl der Kraftlinienschnitte pro Umdrehung $= 2p \cdot N \cdot z'$.

Bei $\frac{n}{60}$ Umdrehungen pro Sekunde demnach die Schnittzahl $2 = p \cdot N \cdot z' \cdot \frac{n}{60} \cdot$ Da elektromotorische Kraft gleich Kraftlinienschnitte pro Sekunde ist, so wird also:

$$E_m = 2p \cdot N \cdot z' \cdot \frac{n}{60} \text{ (c, g, s — Einheiten.)}$$

Oder:

$$E_m = 2p \cdot N \cdot z' \cdot \frac{n}{60} \cdot 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Ferner, da: $\frac{p \cdot n}{60} = \nu$ $\frac{p \cdot n}{60} = \nu$, so folgt:

$$E_m = 2 \cdot N \cdot \nu \cdot z' \cdot 10^{-8} \text{ Volt.} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

Für den Maximalwert liefert Gleichung (5)

$$E_{max} = \pi \cdot \nu \cdot N \cdot z' \cdot 10^{-8}.$$

Für den Effektivwert ergibt sich dann, da derselbe gleich $\frac{E_{max}}{\sqrt{2}}$ ist:

$$E = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot N \cdot \nu \cdot z' \cdot 10^{-8} = 2{,}22 \cdot N \cdot \nu \cdot z' \cdot 10^{-8} \text{ Volt.} \quad . \quad (7)$$

Wie man erkennt, kommt für sinusförmigen Verlauf in die Gleichung für die effektive elektromotorische Kraft der Faktor 2,22 hinein. Allgemein werde derselbe mit k bezeichnet. Für sinoidalen Verlauf ist dann:

$$E = k \cdot N \cdot \nu \cdot z' \cdot 10^{-8} \text{ Volt.} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

5. Die elektromotorische Kraft bei nicht sinoidalem Verlauf.

Die Kurvenform der elektromotorischen Kraft einer Wechselstrommaschine hängt in erster Linie von der Art der Wickelung, dann aber auch von dem gewählten Verhältnis Polbreite zu Polteilung ab. Auch Eisen innerhalb der Spulen, sowie Art und Größe der Belastung beeinflussen die Form der Kurve.

Eine jede periodisch wiederkehrende, nicht sinusförmige Schwingung läßt sich nun nach der Fourier'schen Reihe in einzelne Sinusschwingungen zerlegen.

Bezeichnet: E_{mom} den Momentanwert der elektromotorischen Kraft,
a_1, b_1 u. s. w. konstante Werte,
α eine Funktion der Zeit,
C eine Konstante,

so ist:

$$E_{mom} = a_1 \cdot \sin \alpha + a_3 \cdot \sin 3\alpha + a_5 \cdot \sin 5\alpha + \cdots\cdots a_n \cdot \sin n \cdot \alpha$$
$$+ b_1 \cdot \cos \alpha + b_3 \cdot \cos 3\alpha + b_5 \cdot \cos 5\alpha + \cdots\cdots b_n \cdot \cos n \cdot \alpha + C.$$

Die Konstante C ist dabei für Spannungen stets und für Ströme fast stets gleich Null.

Durch Differentiation der Reihe würde sich dann der Effektivwert finden lassen.

Einfacher ergibt sich aber in jedem Falle der Effektivwert, indem man für die betreffende Kurve den Faktor k in Gleichung 8) ermittelt. Derselbe ist nämlich das Doppelte des Formfaktors f.

Für eine Sinuskurve ist [illegible]

$$[illegible]$$

Also [illegible]

Die Figuren [illegible] enthalten eine Anzahl von Wechselstromkurven, für welche der Formfaktor [illegible] in nachstehender Tabelle angegeben ist:

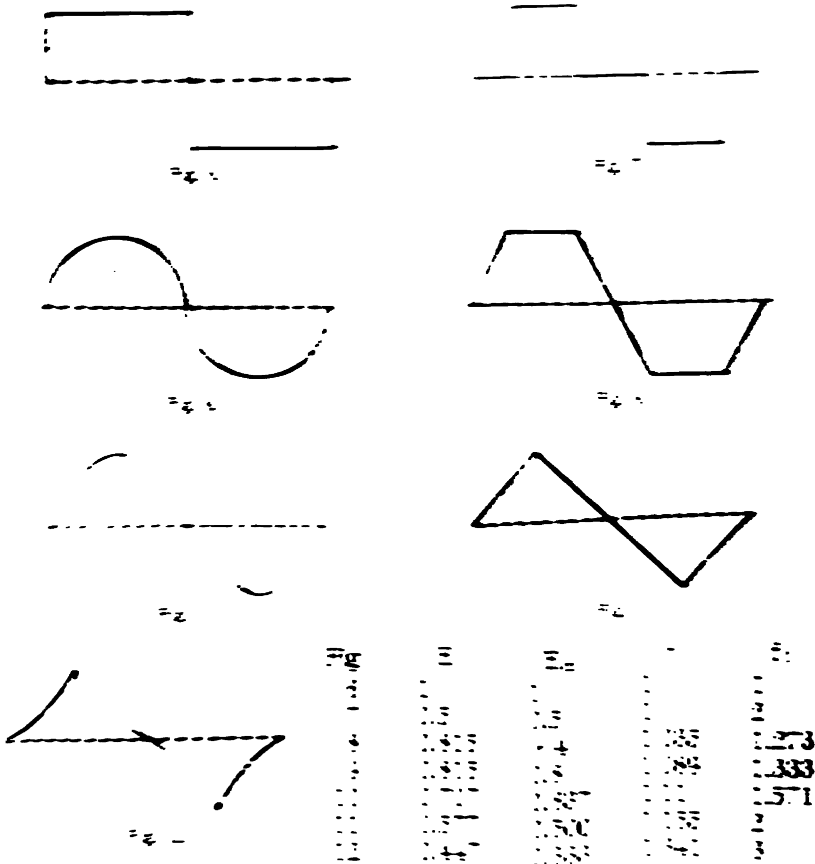


Fig.	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	1.273
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	1.333
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	1.571
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Das Verhältnis des Maximalwertes zum Mittelwert wird nach Benischke „Scheitelfaktor" genannt. Auch dieser Faktor ist in der Kolumne [illegible] für die verschiedenen Formen angeführt.

[illegible] Die Wechselstromwirkungen.

Die Wechselstromwirkungen lassen sich zunächst mit Rücksicht auf die Form des Effektes unterscheiden als [illegible]

oder Lochwickelung und Zackenwickelung. Bei der glatten Wickelung sind die Spulen einfach auf die Ankeroberfläche aufgelegt (Fig. 13), bei der Nuten- oder Lochwickelung werden dieselben in Nuten oder Löcher des Ankers eingelegt (Fig. 14), während bei der Zackenwickelung der Anker polähnliche Vorsprünge trägt, auf welche die Spulen aufgeschoben werden (Fig. 15). Die glatten Anker zeichnen sich dabei durch geringe Selbstinduktion und sinusförmigen Verlauf der Spannungskurve aus. Die solide Befestigung der Ankerspulen ist aber, besonders bei größeren Maschinen, schwer zu erreichen. Bei Nutenankern ist zwischen Ein- und Mehrlochwickelung zu unterscheiden. Bei der Mehr-

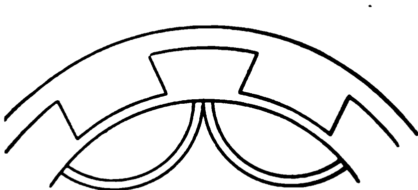


Fig. 13.

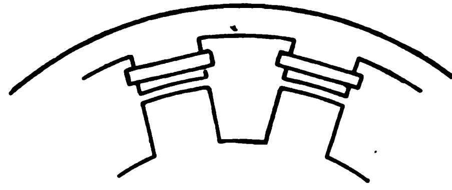


Fig. 15.

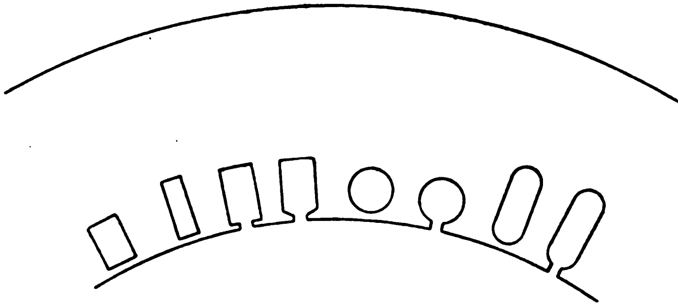


Fig. 14.

lochwickelung werden die Drähte einer Spulenseite in mehreren Löchern verlegt, was eine geringere Ankerselbstinduktion und eine bessere Sinuskurve zur Folge hat gegenüber der Einlochwickelung. Auf den Vorsprüngen der Zackenanker lassen sich die Spulen zwar sehr gut befestigen, sie liefern aber stets eine überaus spitze Spannungskurve. Die Größe der elektromotorischen Kraft ist, wie bereits erwähnt, von der Spulenbreite s und dem Verhältnis Polbreite zu Polteilung $\frac{\beta}{\tau}$ abhängig.

In zweiter Linie lassen sich die Wechselstromwickelungen dann unterscheiden in Einphasen- und Mehrphasenwickelungen, je nach der Anzahl der Phasen, die der Anker trägt. Legt man z. B. auf den Anker um 90° verschoben gegen die erste Spule eine zweite von gleicher Windungszahl, so hat man eine Zweiphasenwickelung (Fig. 16 u. 17). Die beiden Spannungen sind dann um 90° oder $\frac{\pi}{2}$ gegen einander ver-

schoben, d. h. wenn die eine gerade ihren Maximalwert erreicht hat, ist die andere Null. Die Maximalwerte sind wegen der gleichen Windungszahl einander gleich.

Ist also die eine Spannung in einem Augenblick $E_{max} \cdot \sin \alpha$, so ist im selben Augenblick die andere um 90° verschobene $E_{max} \cdot \sin (\alpha + 90^0)$. Drücken wir den Winkel α durch das Produkt aus Winkelgeschwindigkeit und Zeit aus, so gilt für die eine Spannung:

$$E_{max} \cdot \sin(\omega \cdot t).$$

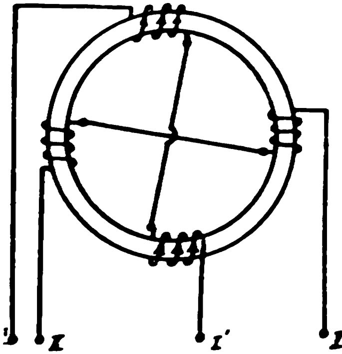


Fig. 16.

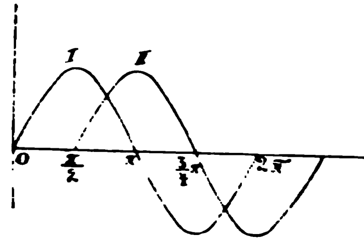


Fig. 17.

Und für die andere: $E_{max} \cdot \sin \left[(\omega \cdot t) + \frac{\pi}{2}\right]$.

Da die elektrische Winkelgeschwindigkeit $\omega = 2\pi \cdot \frac{p \cdot n}{60} = 2\pi \cdot \nu$,

so ist auch: $E_{max} \cdot \sin (\omega \cdot t) = E_{max} \cdot \sin (2\pi \cdot \nu \cdot t)$. . . . (9)

und: $E_{max} \cdot \sin \left[(\omega \cdot t) + \frac{\pi}{2}\right] = E_{max} \cdot \sin \left[2\pi \cdot \nu \cdot + \frac{\pi}{1}\right]$. (10)

Zwischen den Klemmen I I', beziehungsweise zwischen II II' herrscht die sogenannte Phasenspannung. (Fig. 16). Dieselbe ist in jedem Augenblick gleich dem doppelten Momentanwert einer einzelnen Spule, da 2 Spulen hintereinander geschaltet sind.

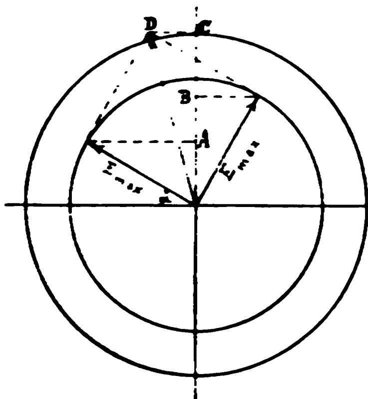


Fig. 18.

Um die Spannung zwischen zwei Außenleitern verschiedener Phasen, die sogenannte Netzspannung oder verkettete Spannung zu finden, müssen wir berücksichtigen, daß sich Spannungen verschiedener Phasen nicht algebraisch, sondern geometrisch addieren. Diese geometrische Addition geschieht mit Hülfe des Vektordiagramms (Fig. 18).

Tragen wir in demselben die beiden gleich großen Maximalwerte um 90° phasenverschoben auf, so sind die Momentanwerte derselben durch die Strecken O A und O B gegeben. Das Kräfteparallelogramm liefert als resultierender wert die Strecke O D. Der resultierende

Momentanwert ist die Projektion von O D auf die Ordinate und gleich O C. Da sich die Momentanwerte in jedem Augenblick algebraisch addieren, so hätte sich O C auch zuerst durch die Summe O A + O B konstruieren lassen.

Für den resultierenden Maximalwert der Zweiphasenspannung ergibt sich nach dem Pythagoras:

$$E_{r_{max}} = \sqrt{E_{max}^2 + E_{max}^2} = \sqrt{2} \cdot E_{max} \quad . \quad . \quad . \quad (11)$$

Für den resultierenden Momentanwert ergibt sich dagegen:

$$\sin(\alpha + 45^0) = \frac{OC}{OD} = \frac{OC}{\sqrt{2} \cdot E_{max.}}$$

$$OC = E_{r_{mom}} = \sqrt{2} \cdot E_{max} \cdot \sin(\alpha + 45^0) \quad . \quad . \quad . \quad (12)$$

Aus dem Vektordiagramm erkennen wir, daß der Maximalwert der verketteten Spannung um 45⁰ in der Phase gegen die beiden anderen Maximalwerte verschoben ist.

Es ist zulässig, statt der 4 Leitungen bei Zweiphasenstrom deren nur 3 zu verwenden, wobei die dritte Leitung als gemeinsame Rückleitung für die beiden anderen Ströme dient (Fig. 19). In dieser gemeinsamen Rückleitung fließt dann ein Strom von der Stärke i · $\sqrt{2}$ = 1,42 i. Der Querschnitt derselben ist demnach 42% stärker zu wählen als der der beiden anderen Leitungen.

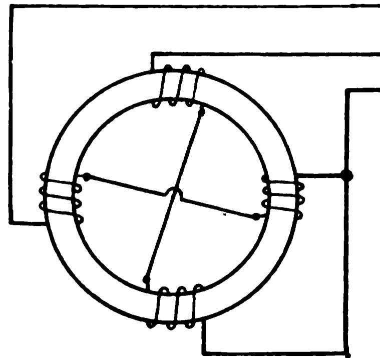


Fig. 19.

Ebenfalls bei Zweiphasenwickelung ausführbar ist die in Fig. 20 dargestellte geschlossene Ringwickelung, bei welcher alle Spulen hintereinander geschaltet werdeh und zwischen je 2 Spulen eine Außenleitung angebracht wird. In Fig. 20 fließt der Strom der Spule I dann durch Leitung 1, durch den äußeren Widerstsnd nach Leitung 1' und von hier nach Spule I'. AnalogverläuftderStrom der Phase II II'.

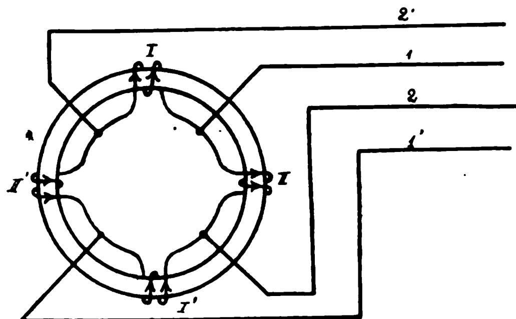


Fig. 20.

Bringt man auf dem Anker 3 um 120⁰ gegen einander versetzte Spulen an, so erhält man die Dreiphasen- oder Drehstromwickelung. Die 3 Phasen können dabei entweder in Dreieck- oder in Sternschaltung miteinander verkettet werden. (Fig. 21 u. 22). Der Punkt O bei der

Sternschaltung (Fig. 22) heißt Null- oder Sternpunkt. Da die algebraische Summe der 3 Phasenströme in jedem Augenblick gleich Null sein muß, wie sogleich gezeigt werden soll, so kommt man mit 3 Leitungen statt mit 6 aus, indem nämlich 2 Leitungen stets als Rückleitungen für den Strom der dritten dienen.

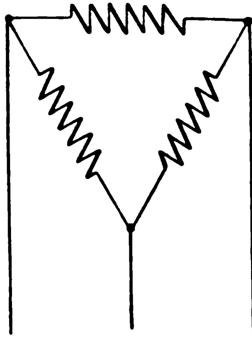


Fig. 21.

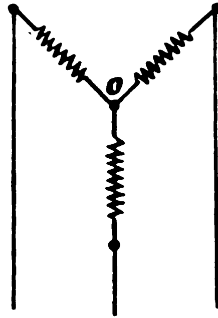


Fig. 22.

Daß die algebraische Summe der 3 Phasenströme in jedem Augenblick gleich Null sein muß, ergibt sich mathematisch, wie folgt:

Bezeichnen wir die 3 Phasenströme mit i_1, i_2 und i_3, so ist:

$$i_1 = i_{max} \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

$$i_2 = i_{max} \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$i_3 = i_{max} \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \frac{4\pi}{3}\right).$$

Also: $i_1 + i_2 + i_3 = i_{max} \cdot \Big[\sin(\omega \cdot t) + \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos\frac{2\pi}{3}$

$$+ \cos(\omega \cdot t) \cdot \sin\frac{2\pi}{3} + \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos\frac{4\pi}{3} + \cos(\omega \cdot t) \cdot \sin\frac{4\pi}{3}\Big].$$

(Mit Benutzung des trigonometrischen Satzes:

$$\sin[\alpha + \beta] = \sin\alpha \cdot \cos\beta + \cos\alpha \cdot \sin\beta\ \cdot)$$

. Nun ist:

$$\sin\frac{2\pi}{3} = +\frac{1}{2} \cdot \sqrt{3} \qquad \cos\frac{2\pi}{3} = -\frac{1}{2}$$

$$\sin\frac{4\pi}{3} = -\frac{1}{2} \cdot \sqrt{3} \qquad \cos\frac{4\pi}{3} = -\frac{1}{2}$$

Demnach:

$$i_1 + i_2 + i_3 = i_{max} \cdot \Big[\sin(\omega \cdot t) - \frac{1}{2} \cdot \sin(\omega \cdot t) + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{3} \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

$$-\frac{1}{2} \cdot \sin(\omega \quad \ldots \quad \cdot \sqrt{3} \cdot \cos(\omega \cdot t)\Big] = 0.$$

Bei Dreieckschaltu[...] 'etzspannung gleich der Phasen-spannung. Der Netzstro[...] us dem Vektordiagramm (Fig. 23).

Sind O A, O B und O C die 3 Phasenwerte, so haben wir zur Konstruktion des resultierenden Stromes aus O A und O B für O B den negativen Vektor O D einzuführen, da derselbe von 2 Strömen hervorgerufen wird, die an der Austrittsstelle in entgegengesetztem Sinne aufeinanderstoßen, indem das Ende der einen Spule mit dem Anfang der anderen verbunden ist.

Trigonometrisch ergibt sich:

$$OE = 2 \cdot \sin 60^0 \cdot OD = 2 \cdot 0{,}866 \cdot OD = 1{,}73 \cdot OD.$$

Also: $\mathbf{i = 1{,}73 \cdot i' = \sqrt{3} \cdot i'}$ . . . . (13)

Dabei bezeichnet i den Netzstrom, i' den Phasenstrom.

Bei der Dreieckschaltung ist also die Netzspannung gleich der Phasenspannung, der Netzstrom dagegen 1,73mal so groß wie der Phasenstrom.

Umgekehrt ist bei Sternschaltung der Phasenstrom gleich dem Netzstrom, die Netzspannung dagegen 1,73 mal der Phasenspannung, wie das Vektordiagramm ergibt, wenn die Vektoren nunmehr die Spannungen bezeichnen. Da bei Sternschaltung Anfang einer Phase an dem Anfang der nächsten liegt, so ist auch jetzt statt O B wieder O D einzuführen und es ergibt sich:

$\mathbf{e = 1{,}73 \cdot e' = \sqrt{3} \cdot e'}$. . (14)

Darin ist e die Netz-, e' die Phasenspannung.

Fig. 23.

Zugleich ersehen wir aus dem Diagramm, daß der Netzstrom bez. die Netzspannung um einen Winkel von 30° gegen den Phasenstrom, bez. die Phasenspannung verschoben ist.

Bei ungleicher Belastung der einzelnen Phasen ist bei Sternschaltung noch eine vierte Leitung vom Nullpunkt aus zu führen, welche als Ausgleichsleiter dient.

Eine Wechselstromwickelung, welcher gleichzeitig Wechsel- und Drehstrom entnommen werden kann, ist von Steinmetz unter dem Namen „Monozyklisches System" angegeben werden. Bei dieser erhält der Anker 2 Reihen verschiedener Nuten, eine Anzahl größerer Nuten, welche zur Aufnahme der sogenannten Hauptspule dienen, und eine Anzahl kleinerer Nuten, in welche die um 90° verschobene Nebenspule zu liegen kommt. Die Hauptspule kann man sich als aus zwei hintereinander geschalteten Einzelspulen bestehend denken. In ihrem elektrischen Mittelpunkt wird das eine Ende der Nebenspule angeschlossen. Die 3 freien Wickelungsenden führen zu 3 Schleifringen. Schematisch ist diese Anordnung durch Fig. 24 dargestellt. Denken wir uns durch die Sehne A B die in den großen Nuten verlegte

Fig. 24.

Hauptspule dargestellt, so ist in deren Mittelpunkt **M die um** 90° verschobene Nebenspule M C anzuschließen.

Soll nun dem Anker gewöhnlicher Dreiphasenstrom entnommen werden können, so muß die Netzspannung für alle 3 Klemmen dieselbe sein, also die Spannung zwischen A C gleich der zwischen A B.

Ist die Spannung in der Hauptspule E, die in der Nebenspule e, so ist die Netzspannung zwischen A—C:

$$\sqrt{\left(\frac{E}{2}\right)^2 + e^2}.$$

Soll A C = A B sein, so gilt demnach:

$$E = \sqrt{\left(\frac{E}{2}\right)^2 + e^2}.$$

Also: $e = \sqrt{\frac{3}{4} \cdot E^2} = \frac{1{,}73}{2} \cdot E = 0{,}866 \cdot E$ . . . . . (15)

Um das Verhältnis 1 : 0,866 zwischen den beiden Spannungen zu erzielen, muß die Drahtzahl der Hauptspule sich zu der der Nebenspule wie 1 : 0,866 verhalten.

Nun können wir aber bei diesem System in einfacher Weise von den Klemmen A B noch einphasigen Wechselstrom, von den Klemmen A M und B M dagegen zwei in der Phase verschobene Wechselströme abnehmen. Darin liegt der Vorteil des monozyklischen Systems, wenn es sich darum handelt, neben Einphasenstrom für Beleuchtungszwecke noch in kleinerem Maße Mehrphasenstrom für Kraftzwecke zu erzeugen. Man stellt dann die Hauptspule entsprechend ihrer stärkeren Belastung aus dickerem Draht, die Nebenspule dagegen aus dünnerem Draht her. Die Lampen schaltet man dann an Phase A B, die Drehstrommotore an die Verkettung an.

Ein weiterer Unterschied ist bei den Wechselstromwickelungen insofern zu machen, als man, ähnlich wie bei Gleichstrom, Schleifenwickelung und Wellenwickelung ausführen kann. Bei der Schleifenwickelung erfolgt die Wickelung rücklaufend, indem man nach Fertigstellung der ersten Spule zu der der ersten Nute benachbarten zurückkehrt und von dieser in die der zweiten Nute der ersten Spule benachbarte Nut die zweite Spule hineinwickelt. Demgegenüber ist die Wellenwickelung eine umlaufende Wickelung, bei welcher in dem angenommenen Sinne immer weiter gewickelt wird. Man wird dabei den Anker mehrmals umlaufen müssen, bevor man ans Ende der Wickelung, d. h. in die für die letzte Spulenseite bestimmte Nut gelangt.

Zu unterscheiden ist ferner bei Ein- und Mehrphasenwickelung noch zwischen Draht- und Stabwickelung. Bei der Drahtwickelung werden die aus einzelnen Drahtwindungen bestehenden Spulen als Schleifenwickelung ausgeführt, während für die aus einzelnen Kupferstäben bestehende Stabwickelung gewöhnlich Wellenwickelung gewählt wird.

Die einphasigen Wechselstromwickelungen sind zunächst dadurch charakterisiert, daß bei denselben nicht alle Nuten des Ankers, sondern nur die vor den Polen liegenden vollgewickelt werden, sodaß wir pro Pol eine Spulenseite erhalten. So zeigt z. B. Fig. 25 eine Einphasen-

wickelung für einen 8-poligen Anker. Die Spannung in einem Loch ist hierbei gleich dem 2p-ten Teil der Gesamtspannung der Maschine. Die Wickelung kann aber auch nach Fig. 26 ausgeführt werden. Hier erhält der Anker doppelt soviel Spulen, aber jede Spule enthält nur halb soviel Drähte wie im Beispiel Fig. 25.

In ein Loch des Ankers kommen dabei 2 Spulenseiten verschiedener Spulen, die aber elektrisch als eine einzige Spulenseite aufgefaßt werden

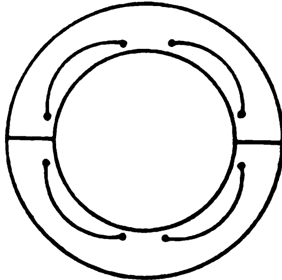


Fig. 25.

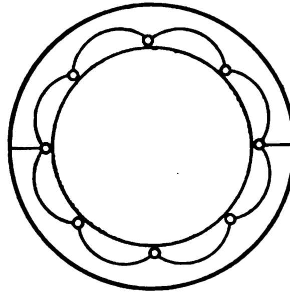


Fig. 26.

können, da sie gleichartig induziert werden. Letztere Anordnung hat einen kleinen Vorteil vor ersterer, der darin besteht, daß für die Spulenköpfe weniger Leitungsmaterial erforderlich wird. Andererseits tritt aber bei letzterer Anordnung in demjenigen Loch, in welchem die erste und letzte Spulenseite zusammenstoßen, zwischen diesen beiden Spulenseiten

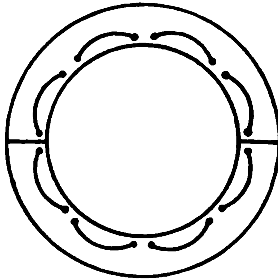


Fig. 27.

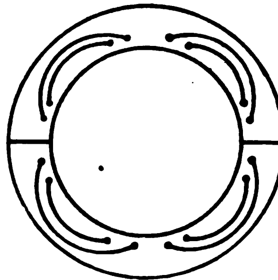


Fig. 28.

die gesamte Spannung der Maschine auf, sodaß hier eine starke Isolation erforderlich wird.

Zweckmäßig werden die Spulen auf dem Anker immer so gelegt, daß sich der Anker aus 2 Teilen zusammensetzen läßt, wodurch eine notwendig werdende Reparatur ausgeführt werden kann, ohne daß Spulen herausgenommen werden müssen. Siehe Fig. 25 u. folg.

Um die Selbstinduktion des Ankers zu vermindern, wird man, wie bereits erwähnt, Mehrlochwickelung anwenden, indem man die Drähte einer Spulenseite in 2 oder mehr Löchern des Ankers unterbringt (Fig. 27). Die Spannung pro Loch ist dann halb so groß als bei der

Einlochwickelung in Fig. 25. Andererseits ist der Querschnitt des Kraftlinienweges für die Ankerstreulinien gegenüber der Einlochwickelung verkleinert worden, sodaß der magnetische Widerstand größer und damit die Ankerselbstinduktion kleiner geworden ist. Will man es vermeiden, die beiden Spulenköpfe übereinander anzuordnen, so kann man

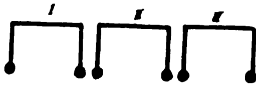


Fig. 29.

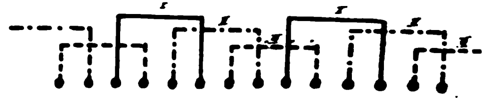


Fig. 30.

auch nach Fig. 28 dieselben nebeneinander legen, womit dann sämtliche Spulenköpfe gleiche Länge erhalten.

Bei Mehrphasenwickelungen unterscheidet man zunächst kurze und lange Spulen. Kurze Spulen sind solche, welche wesentlich kürzer als die Polteilung sind. Lange Spulen umfassen dagegen die ganze oder annähernd die ganze Polteilung. Fig. 29 stellt z. B. eine Dreiphasenwickelung mit kurzen Spulen dar. Die 3 Spulen I, II und III nehmen zusammen eine Polteilung ein. Fig. 30 zeigt dagegen lange Spulen. Eine einzige Spule umfaßt dabei die ganze Polteilung. Die langen

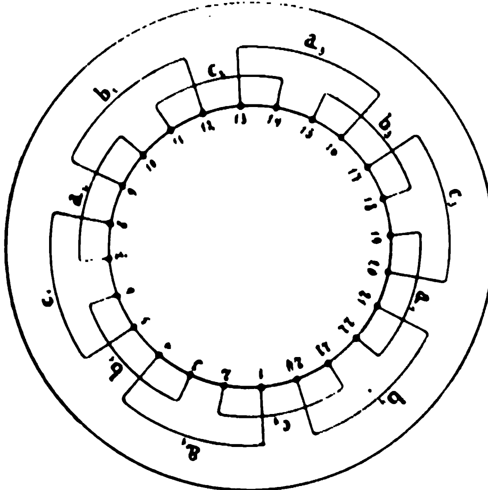


Fig. 31.

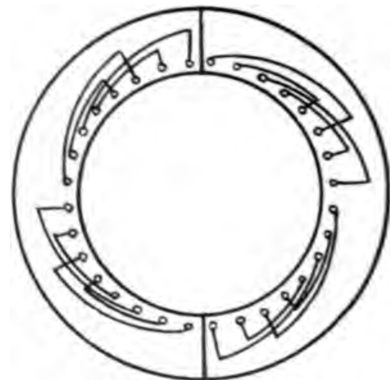


Fig. 32.

Spulen werden in der Praxis fast ausschließlich verwendet, da sie vor den kurzen Spulen den Vorteil geringerer Selbstinduktion haben.

In Fig. 31 ist eine Dreiphasenwickelung für einen 8-poligen Anker mit Einlochwickelung ausgeführt, während Fig. 32 eine 8-polige Zweiphasenwickelung mit 2 Löchern pro Spulenseite zeigt. Letztere ist so eingerichtet, daß sich der obere Teil des Ankers abheben läßt, ohne daß eine Spule ausgewickelt werden muß.

Was nun die praktische Ausführung der Wickelungen anbelangt, so ist folgendes zu berücksichtigen:

Drahtwickelungen [illegible] mit gleichen oder mit übergreifenden

Spulen ausgeführt sein. Drahtwickelung mit gleichen Spulen kann immer angewendet werden, während übergreifende Spulen nur in bestimmten, von der Polzahl abhängigen Fällen möglich sind.

Eine ausgeführte 8-polige Dreiphasenwickelung mit gleichen Spulen zeigt Fig. 33. Phase I ist durch die freigelassenen, Phase II durch die mit einem Punkt versehenen und Phase III durch die schwarz angelegten Kreise kenntlich gemacht. Die Leitungen I, II, III bedeuten die Anfänge der 3 Phasen, während die Enden derselben I′, II′, III′ mit einander verbunden sind, wodurch der Anker Sternschaltung erhalten hat. Es sind 6 Drähte pro Pol, also 2 pro Pol und Phase angeordnet.

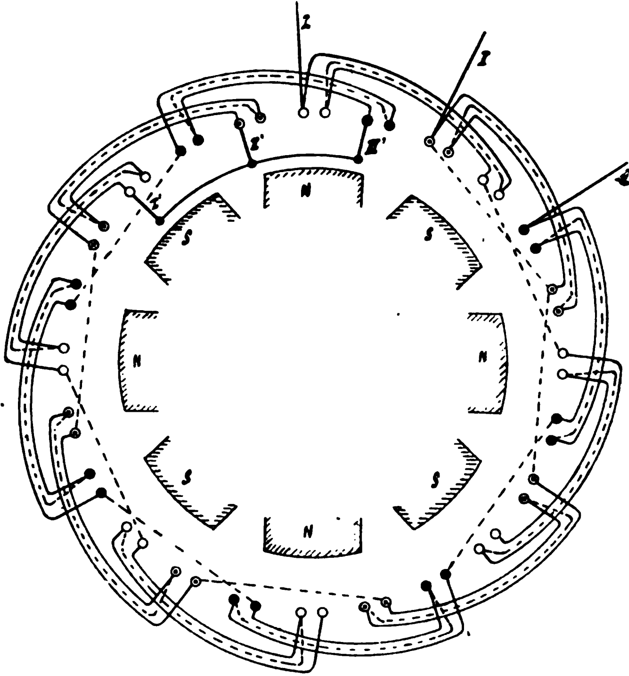


Fig. 33.

Der Anker besitzt, da 2 Drähte in eine Nut kommen, $3 \cdot 8 = 24$ Nuten, also Einlochwickelung. Die Spulen können vorher auf Schablonen fertiggestellt und dann in die Nuten eingelegt werden. Die ausgezogenen Verbindungen an den Spulenköpfen sind auf der vorderen Stirnfläche zu denken, während die punktierten auf der hinteren Stirnfläche verlaufen. Es ist darauf hinzuweisen, daß die hinteren Spulenköpfe eine Stirnverbindung weniger als die vorderen haben.

Bezüglich der Drahtwickelung mit übergreifenden Spulen ist zu beachten, daß dieselbe nur da ausführbar ist, wo die Spulenzahl eine gerade Zahl ist, da, wie wir aus dem in Fig. 34 gezeichneten Schema ersehen, ebensoviel hohe wie niedrige Spulen vorhanden sein müssen. Dann muß auch der Wert 3 p (p = halbe Polzahl) eine gerade Zahl

sein: Das Schema Fig. 34 zeigt eine 12-polige Dreiphasenwickelung mit übergreifenden Spulen. In diesem Falle ist 3 p = 3 · 6 = 18 eine gerade Zahl, während z. B. bei 10 Polen 3 p = 15 eine ungerade Zahl

Fig. 34

ergibt, so daß hier bei Drahtwickelung nur gleiche Spulen in Frage kämen.

Stabwickelungen, die, wie erwähnt, als umlaufende Wellenwickelung ausgeführt werden, sind in den Fig. 35 und 36 dargestellt. In Fig. 35 ist eine umlaufende 8-polige Einphasenwickelung gezeichnet. Es sind pro Pol und Phase 2 Nuten gezeichnet, und jede Nut enthält 2 übereinanderliegende Stäbe. Würden die durch punktierte Striche angedeuteten Nuten in gleicher Weise vollgewickelt werden, so hätten wir eine Dreiphasenwickelung vor uns. Die Wickelung ist hier als soge-

nannte Mantelwickelung auszuführen; bei derselben ist jeder Stab an einem Ende so weit umgebogen, daß er bis zu dem nächsten, mit ihm zu verbindenden Stabe reicht. Dieser nächste Stab ist auf der anderen Seite in derselben Weise umgebogen. Die elektrische Verbindung zwischen dem Bogenstück und dem herausragenden geraden Stabe erfolgt dadurch, daß um die blanken Enden ein Kupferband gelegt und das ganze zusammengelötet wird.

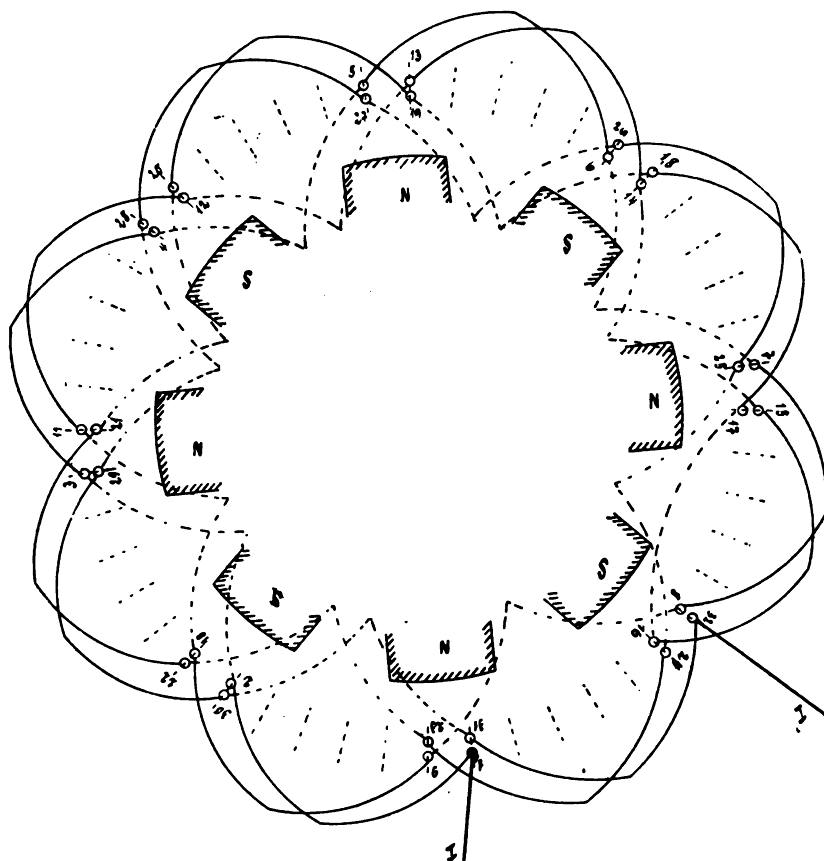


Fig. 35.

Im Wickelungsschema selbst ist noch folgendes zu beachten: Es wird zunächst immer der links oben liegende Stab mit dem nächsten links oben liegenden verbunden, also z. B. von 1 nach 2, von 2 nach 3, von 3 nach 4 u. s. w. Von 8 nach 9 ist dagegen die Verbindung unregelmäßig, da sonst nicht mehr weiter gewickelt werden könnte. Hierauf geht es wieder regelmäßig von 9 nach 10 u. s. w. bis nach 16, wo, um die Wickelung zu Ende führen zu können, von jetzt ab umgekehrt gewickelt werden muß. Im weitern Verlauf haben wir dann nochmals eine unregelmäßige Verbindung von 24 nach 25.

Die Figur 36 zeigt eine 4-polige Dreiphasenwickelung mit Bogen-verbindungen. Es sind 2 Nuten pro Pol und Phase angeordnet, jede Nute enthält einen Stab. Bei der Bogenwickelung werden die Stäbe in die Nuten eingelegt, während die Enden zweier Stäbe durch einen

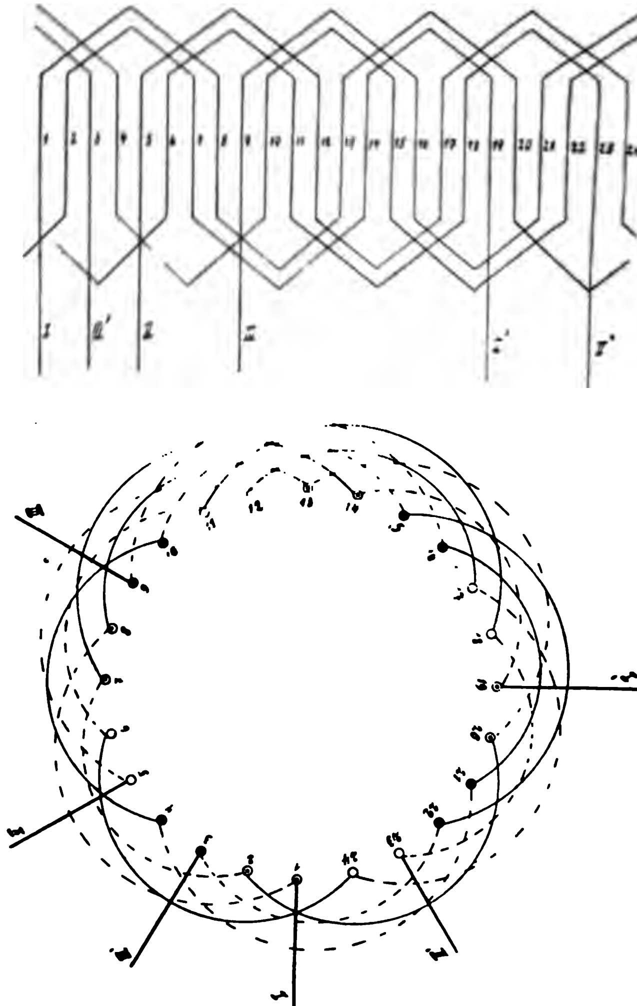
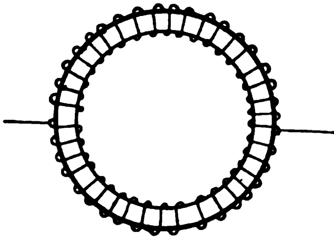


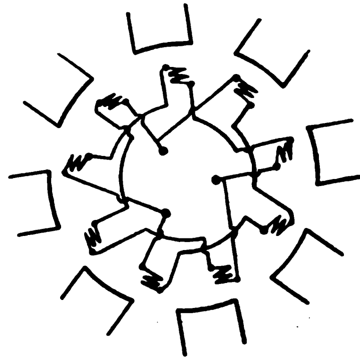
Fig. 36.

Kupferbogen miteinander verbunden werden. Es ist klar, daß, um eine Berührung der Bogenverbindungen zu vermeiden, die Stäbe in einer bestimmten Weise ungleich lang sein müssen. Aus diesem Grunde wird auch die Anwendung der Bogenwickelung bei 3 Phasen nur bedingt möglich; sie ist nur ausführbar, wenn die Anzahl der Spulenseiten durch 4 teilbar ist.

Bei Einphasenanker ist Bogenwickelung dagegen immer möglich.

Auch die gewöhnlichen geschlossenen Gleichstromwickelungen sind für Wechselstrom verwendbar. Führt man von 2 diametral gegenüberliegenden Punkten einer zweipoligen Ringwickelung (Fig. 37) 2 Leitungen zu Schleifringen, so erhält man einphasigen Wechselstrom. Bei vier um 90° versetzten Abnahmepunkten liefert derselbe Anker zweiphasigen Wechselstrom und bei 3 um 120° voneinander liegenden Schleifbürsten erhalten wir Drehstrom. Bei einer Gleichstromwickelung für Einphasenstrom ist die Spulenbreite s gleich der Polteilung τ, bei Dreiphasenstrom wird $s = \frac{2}{3} \tau$. Ist die Maschine zweipolig, so ist bei Einphasenstrom der Abstand der Schleifbürsten 180°, bei mehrpoligen Maschinen sind dagegen die Abnahmepunkte in einem Abstande $\frac{180^0}{p}$ anzubringen. Analog ist bei Mehrphasenmaschinen der Abstand der Schleifbürsten bei mehrpoliger Ausführung der Maschine $\frac{1}{p}$ mal kleiner zu wählen als bei der zweipoligen Maschine.


Fig. 37.


Fig. 38.

Eine eigentümliche Dreiphasenwickelung ist die in Figur 38 gezeichnete, welche von Lamme herrührt und diesem patentiert ist. Dieselbe erhält bei 8 Polen 9 Spulen, deren Schaltung aus der Figur ohne weiteres zu ersehen ist.

Bezeichnet bei einer Zweiphasenwickelung q die Anzahl der Löcher pro Pol und Phase, so haben wir auf dem Anker insgesamt $2 \cdot 2p \cdot q = 4p \cdot q$ Löcher. Soll der Anker unter Beibehaltung derselben Polzahl für Dreiphasenwickelung eingerichtet werden, so würden wir pro Pol und Phase $\frac{4p \cdot q}{3 \cdot 2p} = \frac{2}{3} \cdot q$ Löcher erhalten. Bei verschiedener Polzahl muß die Bedingung erfüllt sein: $4p_2 \cdot q_2 = 6p_3 \cdot q_3$. Die Indices bezeichnen dabei die Phasenzahl.

6. Die elektromotorische Kraft für die verschiedenen Wechselstromwickelungen.

Es ist schon verschiedentlich darauf hingewiesen worden, daß die Kurve für die elektromotorische Kraft in den gebräuchlichen Wechsel-

strommaschinen mehr oder weniger von der Sinuskurve abweicht. Es wurde angegeben, daß die Kurvenform wesentlich durch die Art der Wickelung und das Verhältnis zwischen Polbreite β und Polteilung τ bedingt wird. Unter der allerdings nicht ganz zutreffenden Annahme, daß die Kraftliniendichte längs des Poles konstant bleibt und zwischen den Polen kein magnetisches Feld vorhanden ist, hat Kapp für die verschiedenen Wickelungen den Faktor k bestimmt, der in die Gleichung für die elektromotorische Kraft der betreffenden Wickelungen einzusetzen ist:

$$E = k \cdot N \cdot \nu \cdot z' \cdot 10^{-8} \text{ Volt.}$$

In den folgenden Tabellen sind nun die von Kapp ermittelten Werte für glatte Wickelung, Zacken- und Nutenwickelung angegeben und zwar sowohl für Gleichpol-, als auch für Wechselpolmaschinen. Bei der Gleichpoltype, bei welcher zu beiden Seiten des nach Art des Schuckert'schen Flachringes gebauten Ankers gleichartige Pole aufeinander folgen, ist dabei als Polteilung τ die halbe Entfernung von Mitte Nordpol bis Mitte Nordpol zu verstehen, während man sonst als Polteilung die Entfernung von Mitte Nordpol bis Mitte Südpol bezeichnet.

Tabelle I.

Glatte Wickelung, lange Spulen.

$\frac{s}{\tau}$	0	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{3}$	1	s = Spulenbreite
$\frac{\beta}{\tau} = 1$	2,00	1,76	1,64	1,49	1,16	Gleichpole.
$\frac{\beta}{\tau} = \frac{4}{5}$	2,23	1,96	1,82	1,66	1,29	Gleichpole.
$\frac{\beta}{\tau} = \frac{2}{3}$	2,46	2,23	2,13	1,94	1,49	Wechselpole.
$\frac{\beta}{\tau} = \frac{1}{2}$	2,83	2,50	2,32	2,12	1,64	Wechselpole.

Tabelle II.

Zackenwickelung.

Breite der Ankerzacken: Teilung	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	
Breite der Polzacken: Teilung $\frac{2}{3}$	2,10	1,73	Wechselpole.
Breite der Polzacken: Teilung $\frac{1}{2}$	2,30	2,00	Wechselpole.

Tabelle III.
Nutenanker, lange Spulen.

	Unendlich viele Löcher pro Pol und Phase.			3 Löcher pro Pol u. Phase		2 Löcher pro Pol u. Phase		1 Loch pro Pol u. Ph.	Geschloss. Wickelg.	Schleich. Wickelg.	
Zahl der Phasen	1	2	3	1 u. 2	1 u. 3	1 u. 2	1 u. 3	1, 2 u. 3	1	3	
$\frac{s}{\tau}$	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{2}{9}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{6}$	0	1	$\frac{2}{3}$	
$\frac{\beta}{\tau} = 1$	1,16	1,64	1,76	1,68	1,80	1,72	1,82	2,00	1,16	1,49	Gleichpole.
$\frac{\beta}{\tau} = \frac{4}{5}$	1,29	1,82	1,96	1,98	2,10	2,02	2,12	2,23	1,29	1,66	Gleichpole.
$\frac{\beta}{\tau} = \frac{2}{3}$	1,49	2,13	2,23	2,16	2,26	2,18	2,30	2,46	1,49	1,94	Wechselpole.
$\frac{\beta}{\tau} = \frac{1}{2}$	1,64	2,32	2,5	2,36	2,54	2,45	2,59	2,83	1,64	2,12	Wechselpole.

Tabelle IV.
Nutenanker, kurze Spulen für Dreiphasenwickelung.

	Gleichpole.	Wechselpole	
$\frac{\beta}{\tau} =$	1	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$
k =	1,64	2,12	2,32

Für rotierende Umformer, die als Gleichstrommotore angetrieben werden und als Generatoren einen ein- oder mehrphasigen Wechselstrom liefern, hat Friese das Verhältnis der Gleichstromspannung zur Wechselstromspannung ermittelt. Für eine Gleichstromspannung $E_g = 1$ ergibt sich eine Wechselstromspannung nach folgender Tabelle:

Eg	Einphasig	Dreiphasig	Zweiphasig	Sechsphasig
1	0,707	0,612	0,500	0,354

7. Die Schaltung der Spulen.

Die einzelnen Spulen eines Wechselstromankers können natürlich, je nach der Bestimmung der Maschine, in Parallel- oder in Serienschaltung miteinander verbunden werden. Bei der Parallelschaltung ist darauf zu achten, daß alle diejenigen Spulenenden, welche in demselben Augenblick den positiven Strom zuführen, an ein und denselben Schleifring angeschlossen werden (Fig. 39). Bei der Hintereinanderschaltung sind die Spulen so miteinander zu verbinden, daß sich die in ihnen induzierten elektromotorischen Kräfte addieren, also in Figur 40 Anfang mit Anfang, Ende mit Ende, Anfang mit Anfang u. s. w. Es lassen sich

auch in geeigneter Weise eine Anzahl Spulen zu Gruppen hintereinanderschalten und diese Gruppen dann parallelschalten. Da bei einfacher Parallelschaltung leicht infolge ungleichmäßiger Stärke der einzelnen Pole ungleiche elektromotorische Kräfte in den einzelnen Spulen induziert werden, so sind die einzelnen Spulen am besten nach dem Prinzip der Serien-Parallelschaltung auf sämtliche induzierende Pole zu verteilen. Eine ganz geringe Ungleichheit der Pole kann schon starke Korrektionsströme in den Spulen und damit übermäßige Belastung und Erwärmung zur Folge haben. Der Wirkungsgrad der Maschine wird dadurch natürlich ebenfalls verschlechtert.

8. Das Verwendungsgebiet der verschiedenen Wechselstromkurven.

Nachdem wir die verschiedenen Wechselstromkurven kennen gelernt haben, muß uns selbstverständlich die Frage auftauchen, welcher von den verschiedenen Kurven der Vorzug zu geben ist. Diesbezügliche Untersuchungen haben ergeben, daß eine jede Kurve sich für ein ganz bestimmtes Verwendungsgebiet am günstigsten erweist. So haben sich die Sinuskurven als zum Betriebe von Motoren am geeignetsten gezeigt,

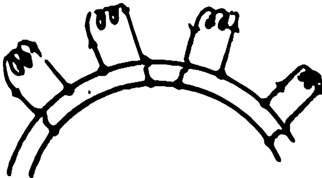


Fig. 9

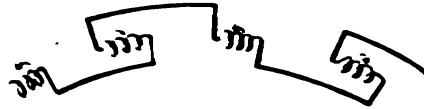


Fig. 10

während für Bogenlampenbetrieb möglichst flache Kurven die besten Resultate in bezug auf eine gute Lichtausbeute ergaben. Für Transformatoren dagegen sollen spitze Kurven am geeignetsten sein, da dieselben geringere Hysteresisverluste und kleinern Leerlaufstrom ergeben als bei flacheren Kurven.

9. Die Magnetsysteme der Wechselstrom-Maschinen.

Bei den Wechselstrommaschinen lassen sich prinzipiell in bezug auf das Magnetsystem Maschinen mit Gleichpolen und Maschinen mit Wechselpolen unterscheiden, während wir in bezug auf das rotierende System zwischen Außen- und Innenpolmaschinen unterscheiden können. Man hat in den Entwickelungsjahren der Wechselstrommaschinen die vier obigen Systeme in mannigfacher Weise zu kombinieren gesucht, bis man schließlich erkannte, daß für Wechselstrommaschinen die Innenpoltype mit Wechselpolen das geeignetste Modell sei. Alle übrigen Systeme, ausgenommen die Außenpolmaschine für kleinere Leistungen, besitzen heute nur noch historisches Interesse, so die im Jahre [illegible] zum erstenmal gebaute Ferranti-Maschine, bei welcher [illegible] gebogene, auf einem Scheibenanker montierte Kupferstreifen zwischen zwei Polreihen rotierten. Auf der einen Seite befinden sich nur Nordpole, auf der andern nur Südpole. Der Anker war eisenfrei konstruiert. Ebenso die

sogenannte Induktortype, bei welcher weder der Anker, noch die Magnete rotierten. Bei dieser rotierten vielmehr in dem Luftraum zwischen Anker und Magneten eine Anzahl massiver Eisenklötze, die durch ihre kontinuierlich wechselnde Stellung gegenüber Anker- und Magnetspulen den magnetischen Widerstand der Magnetkraftlinien änderten und so eine kontinuierlich sich ändernde E · M · K in den Ankerspulen induzierten. Ferner die der Induktortype nahestehende Mordey-Maschine, bei welcher zwei Reihen klauenförmig sich gegenüberstehender Pole von einer einzigen Spule magnetisiert wurden (Gleichpole), während zwischen den rotierenden Polklauen sich die feststehenden Ankerspulen befanden. Alle diese älteren Typen weisen entweder eine komplizierte Bauart auf, oder sie besitzen unverhältnismäßig große Streuung.

Die heute allgemein gebaute Innenpoltype mit Wechselpolen weist demgegenüber eine Anzahl wichtiger Vorzüge auf. Bei ihr steht der aus ·Blechen zusammengesetzte Anker fest, so daß die Enden der Wickelung zu zwei feststehenden und leicht voneinander zu isolierenden Klemmen geführt werden können. Die Magnetpole werden auf einen gußeisernen, als Schwungrad ausgebildeten Ring aufgeschraubt. Der Erregerstrom wird zwei Schleifbürsten zugeführt und von zwei Schleifringen, die mit der Wickelung verbunden sind, abgenommen. Bei dieser Anordnung lassen sich leicht große Umfangsgeschwindigkeiten bei relativ geringer Tourenzahl infolge der großen radialen Dimensionen erzielen. Die Außenpoltype wird nur noch bei kleinern Maschinen angewendet. Hier muß natürlich infolge des rotierenden Ankers der Wechselstrom durch Schleifringe abgenommen werden.

10. Diagramme der Wechselstrommaschine.

Die Verhältnisse in einer Wechselstrommaschine lassen sich in überaus einfacher Weise durch das Kappsche Diagramm darstellen, wenn man den Selbstinduktionskoeffizienten der Maschine als konstant voraussetzt. Wir haben dann im Anker selbst einen bestimmten Spannungsabfall, der sich aus dem Ohmschen und induktiven Spannungsabfall im Anker zusammensetzt.

So ergibt sich in Fig. 41 das Spannungsdreieck O A B, in welchem O B gleich der innern Selbstinduktion Es_{innen} und die senkrecht dazu stehende Strecke A B gleich dem Ohmschen Spannungsverlust im Anker $i \cdot w_a$ ist. O A stellt dann den gesamten Spannungsabfall im Anker dar.

Fig. 41.

Im äußern Kreise haben wir mit der Klemmspannung e den äußern Ohmschen Spannungsabfall $i \cdot w$ = D E und den induktiven Spannungsverlust B C = A D = $Es_{außen}$ zu überwinden. Die elektromotorische Kraft der Maschine ergibt sich dann als Resultirende aus O A und A E als E = O E. Der Phasenverschiebungswinkel außen liegt zwischen Klemmspannung und Strom, also $\measuredangle \varphi$ = A E D.

Ein solches Diagramm gestattet auch leicht, die einzelnen Größen in einer Wechselstrommaschine zu berechnen. Z. B. arbeite die Maschine mit einer Klemmspannung $e = 3000$ Volt und 60 Amp. bei einem äußern $\cos \varphi = 0{,}8$. Dann ist siehe Fig. 41:

$$\cos \varphi = \frac{i \cdot w}{e} \qquad i \cdot w = e \cdot \cos \varphi = 3000 \cdot 0{,}8 = 2400 \text{ Volt.}$$

Da $i = 60$ Amp., so ist der äußere Widerstand:

$$w = \frac{2400}{60} = 40 \text{ Ohm.}$$

Ferner: $\sin \varphi = \frac{Es_{außen}}{e}$

$$Es_{außen} = e \cdot \sin \varphi = 3000 \cdot 0{,}6 = 1800 \text{ Volt.}$$

Die Periodenzahl sei 50 pro Sekunde, dann ist:

$$Es_{außen} = L\omega \cdot i_{außen} = L \cdot 2\pi \cdot \nu \cdot i.$$

L bezeichnet dabei den äußern Selbstinduktionskoeffizienten.

Also: $L = \frac{Es}{2\pi \cdot \nu \cdot i} = \frac{1800}{2\pi \cdot 50 \cdot 60} = 0{,}0956$ Henry.

Der Ankerwiderstand w_a sei gleich 0,5 Ohm, der Selbstinduktionskoeffizient des Ankers L gleich 0,03 Henry. Dann wird:

$$i \cdot w_a = 60 \cdot 0{,}5 = 30 \text{ Volt.}$$

$$Es_{innen} = L\omega \cdot i_{innen} = 0{,}03 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 60 = 566 \text{ Volt.}$$

Die elektromotorische Kraft ergibt sich nunmehr nach dem Pythagoras:

$$E = \sqrt{\Sigma (i \cdot w)^2 + \Sigma (Es)^2} = \sqrt{(2400 + 30)^2 + (1800 + 566)^2} = 3340 \text{ Volt.}$$

Das Kappsche Diagramm gibt uns aber auch noch in überaus einfacher Weise Aufschluß über den Spannungsabfall zwischen Leerlauf und Belastung bei verschiedenem Phasenverschiebungswinkel. Schlagen wir einen Kreis in Fig. 42 mit O E als Radius um O und hierauf um A einen Kreis und verlängern A E über E hinaus bis F, so stellt uns die Strecke A F — A E = E — e den Spannungsabfall der Maschine bei dem betreffenden $\cos \varphi$ dar. Das zwischen den beiden Kreisen liegende Stück gibt in jedem Falle diesen Spannungsabfall an. In den Fig. 43 und 44 ist das Diagramm einmal für rein Ohmsche, das andere Mal für rein induktive Belastung gezeichnet. Wir erkennen, daß im letztern Falle der Spannungsabfall bedeutend wird gegenüber dem bei induktionsfreier Belastung. Wenn wir die Phasenverschiebung negativ machen, so wird der Spannungsabfall zunächst im Punkte G gleich Null, um dann sogar negativ zu werden, d. h. die Klemmspannung der Maschine wird größer wie die elektromotorische Kraft. Die Erklärung dieser Erscheinung muß einem spätern Abschnitt vorbehalten werden.

Das Kappsche Diagramm setzt nun als Grundlage den konstanten Selbstinduktionskoeffizienten der Maschine voraus. Daß dies aber nicht der Fall ist, vielmehr der Selbstinduktionskoeffizient mit der Phasenverschiebung sich ändert, ergeht aus folgender Überlegung: Zu dem Zwecke fassen wir 2 Extremfälle ins Auge, den einen in Fig. 45 skizzierten, wo die Phasenverschiebung Null, und den durch Fig. 46 dargestellten Fall, in welchem die F[illegible]schiebung 90° beträgt. In Fig. 45

schließen sich die vom Anker erzeugten Kraftlinien in der Weise, daß ein Teil sich durch das Ankereisen hindurch schließt, während ein anderer Teil durch die Luft hindurch in die Polköpfe eintritt und hier den Magnetkraftlinien entgegenwirkt. Im zweiten Falle erkennen wir dagegen sofort, daß hier der magnetische Widerstand für die Ankerkraftlinien ein ganz anderer geworden ist, daher auch die Anzahl der den Magnetkraftlinien entgegenwirkenden Ankerkraftlinien eine andere wird. Die Wirkung der durch die Pole verlaufenden Ankerkraftlinien ist nun die, daß sie den Magnetkraftlinien entgegenwirken, ihre Anzahl verringern und so eine geringere Induktion in den Polen schaffen.

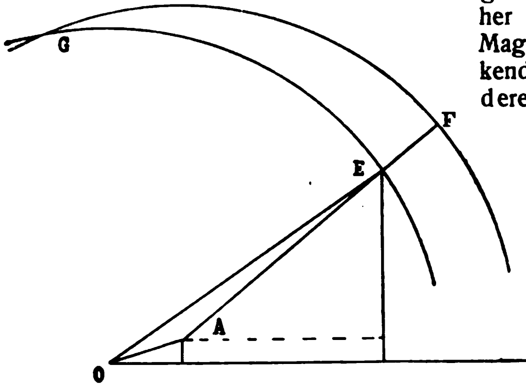


Fig. 42.

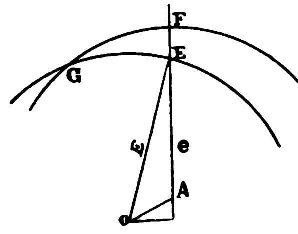


Fig. 43.

Dadurch ändert sich nun sofort die Leitfähigkeit des Eisens bei Betrieb gegenüber dem Leerlauf und hiermit auch nach der Formel für den Selbstinduktionskeoffizienten: $L = \frac{4\pi \cdot \xi^2 \mu \text{ u. } Q}{l} \cdot 10^{-9}$ der Selbstinduktioeskonffizient der Maschine.

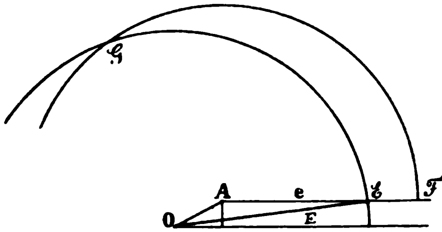
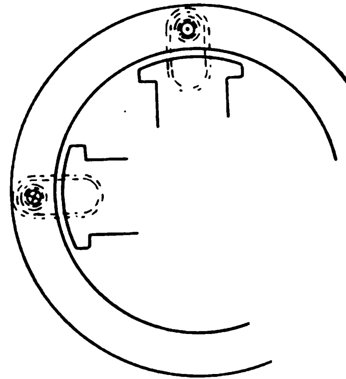


Fig. 44.


Fig. 45.

Um nun diesen Verhältnissen Rücksicht zu tragen, zerlegt Kapp die gesamten Ankerkraftlinien in 2 Teile, indem er die im Innern des Ankereisens verlaufenden Kraftlinien als die eigentliche Selbstinduktion der Maschine bezeichnet, während er die andern durch die Pole sich schließenden Ankerkraftlinien als Ankerrückwirkung der Maschine zusammenfaßt. Indem er dann die früher als $E_{S_{\text{innen}}}$ bezeichnete Spannung in die eigentliche, von den im Anker verlaufenden Kraftlinien erzeugte,

innere Selbstinduktion Es und in eine scheinbar durch die, durch die Pole sich schließenden Ankerkraftlinien hervorgerufene elektromotorische Gegenkraft Eg zerlegt, gelangt Kapp zu dem in Fig. 47 gezeichneten Diagramm. Bei Betrieb ist dabei tatsächlich vorhanden die elektromotorische

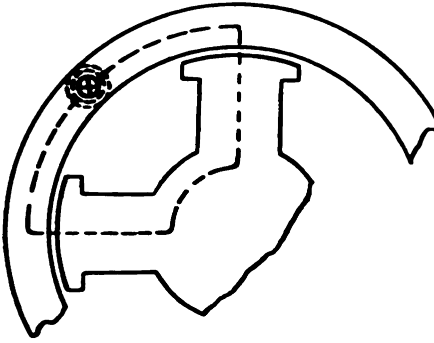


Fig. 46.

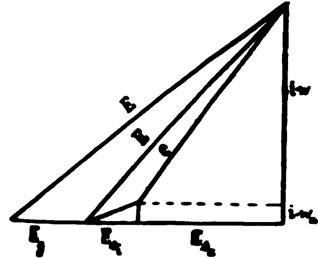


Fig. 47.

Kraft E. Dieselbe ist aber entstanden zu denken durch die geometrische Subtraktion der elektromotorischen Gegenkraft Eg von einer elektromotorischen Kraft E_1, die bei Leerlauf existieren würde, wenn die Leitfähigkeit des Eisens ebenso groß wäre, wie bei dem betreffenden Betriebszustand.

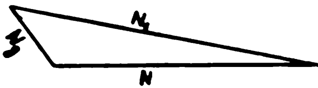


Fig. 48.

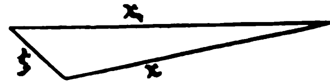


Fig. 49.

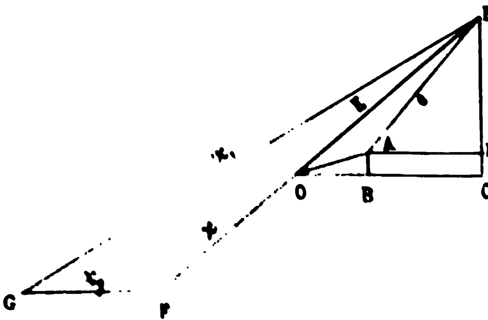


Fig. 50.

Wir können nun statt der elektromotorischen Kräfte auch die diese erzeugenden Kraftlinien setzen und erhalten so Fig. 48. Setzt man schließlich in Fig. 49 statt der Kraftlinien die diese erzeugenden Ampèrewindungen, so läßt sich bezüglich dieser Ampèrewindungen folgendes sagen: Die statische Charakteristik der Maschine ergibt uns für die bei Betrieb tatsächlich existierende elektromotorische Kraft E einen Wert von X Ampèrewindungen. In Wirklichkeit haben wir aber auf den Polen aufzuwenden einen Wert von X_1 Ampèrewindungen, der sich als die geometrische Summe von X und Xg ergibt.

Um zu zeigen, wie dieses Diagramm zur Berechnung der resultierenden Ampèrewindungen Verwendung finden kann, sei durch Fig. 50 das Diagramm OEC einer Wechselstrommaschine festgelegt. Es ergibt sich aus demselben eine elektromotorische Kraft E = OE. Die statische Charakteristik der Maschine ergibt nun für diesen Wert von OE eine bestimmte Ampèrewindungszahl X, welche durch die Strecke FE gegeben sein möge. Im Punkte F wird nun, parallel zu OC der Betrag der Ankerrückwirkung Xg = FG angetragen. EG = X_1 stellt dann die resultierende, auf den Magneten aufzuwendende Ampèrewindungszahl in dem gewählten Maßstabe dar.

In diesem Kappschen Diagramm ist die Streuung der Pole nicht berücksichtigt. Wollen wir auch diese mit einführen, so gelangen wir zu dem in Fig. 51 gezeichneten Diagramm. N_0 sei nach Richtung und Größe das im Anker existierende Feld, E senkrecht dazu stehend die durch N_0 induzierte elektromotorische Kraft, J die Richtung des Ankerstromes. Mit J gleichgerichet ist der Ohmsche Spannungsabfall im Anker, der von E geometrisch subtrahiert die Klemmspannung e liefert.

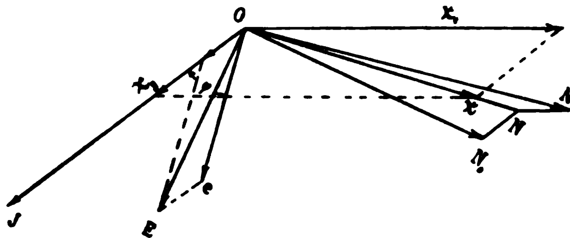
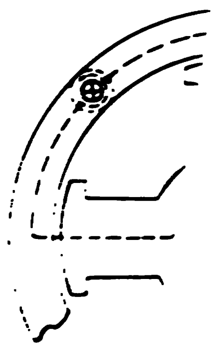


Fig. 51.

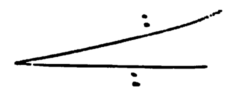
Ebenfalls mit J gleichgerichtet ist die Ankerrückwirkung Xg. Parallel zu dieser ist das durch die eigentliche Selbstinduktion induzierte Ankerstreufeld gerichtet, welches mit N_0 das im Luftraum befindliche Feld N ergibt. Die Ampèrewindungszahl X ist dann in der Richtung des Feldes N aufzutragen. Ihre Zusammensetzung mit X_g liefert den auf den Polen aufzuwendenden Betrag X_1. Um nun auch das Streufeld der Pole zu berücksichtigen, ist zu bedenken, daß seine Richtung parallel mit X_1 verlaufen muß. So ergibt sich dann das in den Polen existierende Feld N_1. Der Phasenverschiebungswinkel φ liegt, wie immer, zwischen den Richtungen der Klemmspannung und des Stromes.

11. Experimentelle Bestimmung der Ankerrückwirkung und Ankerstreuung.

Die Größe der Ankerrückwirkung einer Maschine läßt sich auf experimentellem Wege dadurch bestimmen, daß man die Maschinen an den äußeren Klemmen kurzschließt und zur verschiedenen Werten des Magnetstomes die zugehörigen Ankerströme mißt. Trägt man dann den Magnetstrom als Abszisse, den Ankerstrom als Ordinate in ein Koordinatensystem







. Berechnung der Gegenampèrewindungen.

eichnet bei einer Einphasenwickelung z' die Anzahl der hinter-
eschalteten Drähte, also $\frac{z'}{2}$ die Windungszahl, i den Effektivwert
rstromes, so ergibt sich der Betrag der Ankerrückwirkung pro
unter Einführung des algebraischen Mittelwertes des Stromes:

$$X_g = i \cdot \frac{10}{11} \cdot \frac{z'}{2p} = 0,45 \frac{i \cdot z'}{p} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (16)$$

ese Formel kann nur als Näherungswert betrachtet werden, da
bei Einphasenmaschinen vorliegenden Verhältnisse trotz des ein-
en Mittelwertes nur ungenügend berücksichtigt. Kapp gibt an,
i Einphasenmaschinen mit ebensoviel Spulen wie Polen zur Am-
ndungszahl eines jeden Pols zur Kompensation der Ankerrück-
g ein Wert:

$$0,0156 \cdot Z \cdot i \cdot \varphi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (17)$$

zuschlagen sei, worin Z die Windungszahl pro Spule, i den effek-
Ankerstrom und φ den Phasenverschiebungswinkel im Gradmaß
utet. Dabei ist noch zu beachten, daß bei positiver Phasenver-
bung die Ankerrückwirkung entmagnetisierend, bei negativer Phasen-
hiebung d. h. bei Phasenvoreilung dagegen magnetisierend wirkt.
Bei Dreiphasenmaschinen läßt sich die Ampèrewindungszahl des
ers, welche als Ankerrückwirkung auftritt, genauer bestimmen. Be-
ntlich ist in dem Augenblick, wo der Strom in einer Phase sein
imum erreicht hat, der Strom in den beiden andern Phasen gleich
. Bezeichnet nun z' die Drahtzahl pro Phase, so ist der Betrag
Gegenwirkung der vom maximalen Strom durchflossenen Spule
$\cdot \frac{z'}{2p} \cdot$ (pro Polpaar). Bezüglich der beiden andern, nur vom halben
trom durchflossenen Phasen ist zu berücksichtigen, daß für beide zusammen
er Luftquerschnitt für ihre Kraftlinien gerade so groß ist wie der Luft-
uerschnitt für die dritte Phase allein. Ihre Gegenwirkung ist also:

$$\frac{2 \cdot 0,5 \cdot i_{max} \cdot z'}{2 \cdot 2p} = \frac{i_{max} \cdot z'}{4p}.$$

Also die gesamte Rückwirkung pro Polpaar:

$$X_g = \frac{i_{max} \cdot z'}{2p} + \frac{i_{max} \cdot z'}{4p} = 1.5 \cdot \frac{i_{max} \cdot z'}{2p}.$$

Oder mit Einführung des Effektivwertes:

$$X_g = 1,5 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot i \cdot z'}{2p} = \frac{2,12 \cdot i \cdot z'}{2p} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (18)$$

Für Zweiphasenmaschinen gilt pro Polpaar:

$$X_g = \frac{\sqrt{2} \cdot i \cdot z'}{2p} = 0,71 \cdot \frac{i \cdot Z}{p} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (19)$$

bedeutet hierin die Drahtzahl pro Phase.
Kapp lassen sich die Ankergegenwindungen folgendermaßen

$$X_g = k_g \cdot z'' \cdot i'. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (20)$$

z″ ist dabei die Drahtzahl pro Pol und Phase.

Dabei ist i′ der Strom pro Phase und k_g ein Faktor, der gegeben ist durch:

$$k_g = p' \cdot \frac{0{,}57}{m} \cdot \sin(m \cdot 180^0).$$

p′ ist die Phasenzahl, m das Verhältnis Polbreite zu Polteilung.

Hiermit ergibt sich:

$$\left.\begin{array}{ll} \text{Für Einphasenmaschinen:} & X_g = \frac{0{,}57}{m} \cdot z'' \cdot i \cdot \sin(m \cdot 180^0) \\ \text{„ Zweiphasenmaschinen:} & X_g = \frac{1{,}13}{m} \cdot z'' \cdot i \cdot \sin(m \cdot 180^0) \\ \text{„ Dreiphasenmaschinen:} & X_g = \frac{1{,}68}{m} \cdot z'' \cdot i \cdot \sin(m \cdot 180^0) \end{array}\right\} \quad (21)$$

X_g ist dabei die Ampèrewindungszahl pro Polpaar.

Die eigentliche Selbstinduktion des Ankers läßt sich nach Kapp auf folgende Weise vorausberechnen:

$$E_s = \frac{k_s \cdot E' \cdot z'' \cdot i'}{X_l} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (22$$

Darin ist: E_s die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion pro Phase,

E' die elektromotorische Kraft pro Phase,

X_l die Ampèrewindungszahl der Luft,

k_s ein von der Nutzahl des Ankers und dem Verhältnis : Polbreite zu Polteilung abhängiger Faktor, dessen Größe sich aus folgender, von Kapp aufgestellter Tabelle ergibt:

m	ks	
$\frac{2}{3}$	0,76	2 Nuten pro Pol und Phase
$\frac{3}{5}$	0,57	
$\frac{4}{7}$	0,5	
$\frac{1}{2}$	0,3	
$\frac{2}{3}$	1,16	1 Nute pro Pol und Phase
$\frac{3}{5}$	1,1	
$\frac{1}{2}$	1,0	

13. Vorausbestimmung des Spannungsabfalles der Maschine.

Der gesamte Spannungsabfall der Maschine zwischen Leerlauf und Vollbelastung läßt sich in einfacher Weise mit Hülfe des bereits genannten Kappschen Diagramms graphisch finden. Zu dem Zwecke berechnet man zunächst die Gegenamperewindungen des Ankers nach den im vorigen Abschnitt angegebenen Formeln und konstruiert die Charakteristik der Maschine. Die Charakteristik ergibt dann den Spannungsabfall, hervorgerufen durch die Ankerrückwirkung bei der betreffenden Phasenverschiebung. (Siehe Kap. II, 14 und 15) Diesen Spannungsabfall wollen wir mit Eg bezeichnen. Hierzu kommt dann noch die eigentliche innere Selbstinduktion Es. Der Ohmsche Spannungsabfall berechnet sich aus $i \cdot w_a$ · Auch die im Anker vagabondierenden Wirbelströme werden einen, wenn auch geringen, Spannungsabfall der Maschine verursachen. Man berücksichtigt letzteren dadurch, daß man den Ohmschen Spannungsverlust um einen gleichen Betrag vermehrt, so daß der Ohmsche und Wirbelstrom-Spannungsverlust

$$Ev = 2\, i \cdot wa \quad \text{ist.}$$

Es sei nun in Fig. 56 OD die elektromotorische Kraft oder die Leerlaufsspannung der Maschine. Ferner:

$$OA = Eg + Es$$
$$AB = Ev = 2i \cdot wa$$

Man beschreibt nun mit OD=E einmal einen Halbkreis von O und einmal von B aus.

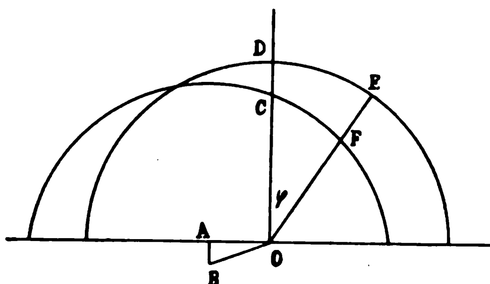


Fig. 56.

Dann stellt die Strecke CD den Spannungsabfall bei induktionsloser Belastung dar.

Bei einer Phasenverschiebung φ ist dann der Spannungsabfall gegeben durch die Strecke EF.

Kap. II.

Die magnetischen Verhältnisse und die Erregung der Wechselstrommaschinen.

14. Bestimmung der Erregung bei variabler Belastung und variabler Phasenverschiebung.

Will man die Erregerampèrewindungen für verschiedenen Ankerstrom und verschiedene Phasenverschiebung ermitteln, so geschieht dies am einfachsten mit Hülfe des in Fig. 57 gegebenen Diagramms: In die Richtung der Abszissenachse trage man vom Punkte O aus die Amperewindungszahl X auf, welche zur Erzeugung der betreffenden Spannung bei Leerlauf erforderlich ist und aus der statischen Charakteristik

entnommen wird. Für einen bestimmten Ankerstrom beträgt die Ankerrückwirkung Xg Amperewindungen. Mit diesem Wert schlage man um O einen Kreis und trage an die Ordinate den Winkel der betreffenden Phasenverschiebung φ an, dessen einer Schenkel den Kreis in A schneidet. Der Radius OA stellt dann die betreffende Ankerrückwirkung bei dem betreffenden cos φ dar. Die auf den Magneten bei Betrieb aufzuwendende Erregung X_1 ergibt sich dann in der Strecke AB als Resultierende aus X und Xg. Bei gleichem Wert von Xg, aber größerer Phasenverschiebung rückt der Radiusvektor OA auf dem Kreise nach links. In derselben Weise läßt sich für jede beliebige Gegenampèrewindungszahl und beliebige Phasenverschiebung die erforderliche Magneterregung X_1 bestimmen. Den Erregerstrom findet man, indem man X_1 durch die Windungszahl pro Polpaar dividiert.

1. Konstruktion der dynamischen Charakteristik aus der statischen mit Berücksichtigung der Phasenverschiebung.

Ist die statische Charakteristik der Maschine bekannt, so läßt sich daraus die dynamische Charakteristik für einen bestimmten cos φ wie folgt konstruieren: Die statische Charakteristik sei in Fig. 58 durch die Kurve OBB' gegeben. An die Ordinate im Punkte O legt man den Phasenverschiebungswinkel φ an und trägt auf dem

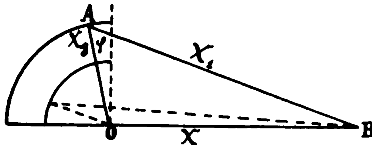


Fig. 57.

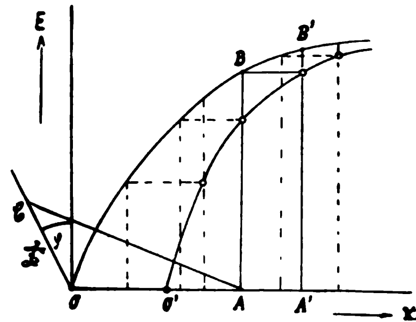


Fig. 58.

linken Schenkel den Betrag der Ankerampèrewindungen pro magnetischen Kreis ab, so daß Xg = OC. Der Maßstab für Xg muß natürlich derselbe sein wie der Maßstab für die Leerlaufsampèrewindungen X, die auf der Abszisse abgetragen sind. Zu einer Erregung X = OA bei Leerlauf gibt dann die statische Charakteristik einen Wert AB als ele[illegible]otorische Kraft. Um nun bei Betrieb diese elektromotorische Kraft A[illegible]eugen[illegible]n wir eine resultierende Erregung X_1 = AC nötig, [illegible]ch [illegible] und OC nach dem Kräftedreieck ergibt. Man t[illegible]ie[illegible] OA' = AC = X_1 auf der Abszisse ab und erric Senkrechten AB und A'B'. Bei Leerlauf würde d elektromotorische Kraft A'B' schaffen, infolge der Betrieb ist dieselbe aber nur gleich AB. Wir e regung OA' die Ordinate der dynamischen Chara die Ordinate AB auf A'B' hinüberprojizieren. W Verfahren für eine Anzahl W Erregung X, sc

Verbindung der Schnittpunkte die dynamische Charakteristik. Der Ausgangspunkt derselben ist O′, wobei OO′ = OC = Xg.

Das Diagramm berücksichtigt in dieser Form noch nicht die Streuung der Pole. Um auch diese einzuführen, muß man die statische Charakteristik mit Berücksichtigung der Feldstreuung konstruieren. In Fig. 59 sei Kurve I die statische Charakteristik ohne Rücksicht auf Feldstreuung, Kurve II sei dagegen die statische Charakteristik, deren Ordinaten die durch die Feldstreuung verminderte elektromotorische Kraft angeben. Ist OC wiederum gleich der Ankerrückwirkung Xg, so haben wir zur Erzeugung einer elektromotorischen Kraft AB bei Betrieb ohne Rücksicht auf Feldstreuung auf den Magneten X_1 = AC = AA′ Amperewindungen aufzuwenden. Die Berücksichtigung der Feldstreuung geschieht nun dadurch, daß man EF parallel BB′ zieht und Punkt F auf A′B′ hinüberprojiziert. A′G ist dann die bei einer Felderregung AC = OA′ erzeugte Betriebsspannung. Dabei ist Punkt F statt D nach A′B′ hinüberzuprojizieren, weil die Feldstreuung angenähert proportional den Feldamperewindungen ist.

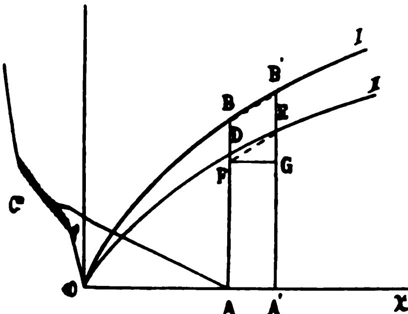


Fig. 59.

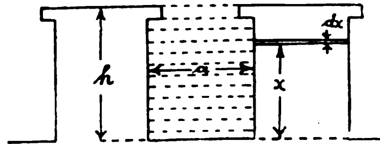


Fig. 60.

16. Die Streuung der Feldmagnete.

Der gesamte Streufluß der Feldmagnete Ns läßt sich in 3 Teile zerlegen, so daß $N_s = N_1 + N_2 + N_3$.

Dabei verstehen wir unter N_1 alle diejenigen Streulinien, welche

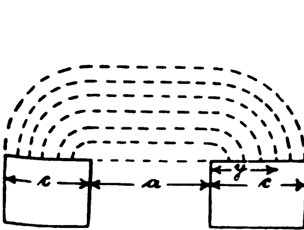


Fig. 61.

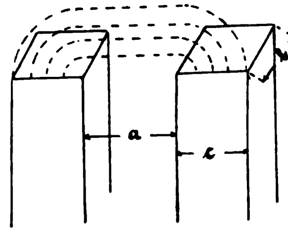


Fig. 62.

zwischen den beiden innern, sich gegenüberstehenden Flächen der Pole übergehen (Fig. 60).

N_2 sind diejenigen Streulinien, welche von Seitenfläche zu Seitenfläche übergehen (Fig. 61). In Figur 61 sind nur die Streulinien der obern Seitenflächen gezeichnet. Natürlich gehen ebensoviel Kraftlinien zwischen den untern Seitenflächen über. Mit N_3 wollen wir sodann

die sich von den Deckflächen der Pole aus schließenden Streulinien bezeichnen (Fig. 62).

Die Kraftlinienzahl N_1 berechnet sich wie folgt: Ist F die magnetomotorische Kraft des magnetischen Kreises, so ist dieselbe im Abstande x: $\frac{F \cdot x}{h}$.

Ist b die Dimension der Pole senkrecht zur Papierebene, so ist der magnetische Widerstand der Luft für die Höhe dx:

$$\frac{a}{b \cdot dx}$$

Demnach die durch diesen Querschnitt gehende Kraftlinienzahl:

$$d N_1 = \frac{\frac{F \cdot x}{h \cdot a}}{b \cdot dx} = \frac{F \cdot b \cdot x \cdot dx}{h \cdot a}.$$

Die längs des Weges von $x = 0$ bis $x = h$ übergehende Kraftlinienzahl ergibt sich dann zu:

$$N_1 = \int_0^h \frac{F \cdot b \cdot x \cdot dx}{a \cdot h} = \frac{F \cdot b}{a \cdot h} \cdot \int_0^h x \cdot dx = \frac{F \cdot b \cdot h}{2 \cdot a}.$$

Da $F = 0{,}4\,\pi \cdot \xi \cdot i$, wenn ξ die Windungszahl bezeichnet, so wird:

$$N_1 = \frac{0{,}4\,\pi \cdot \xi \cdot i}{2} \cdot \frac{b \cdot h}{a} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (23)$$

Bei mehrpoligen Maschinen streut jede Seitenfläche des Nordpols nach dem Südpol, so daß der Streufluß doppelt so groß wird, wie bei zweipoligen Maschinen. Für Wechselstrommaschinen, die ja stets vielpolig ausgeführt sind, ist also:

$$N_1 = 2 \cdot \frac{0{,}4\,\pi \cdot \xi \cdot i}{2} \cdot \frac{b \cdot h}{a} = 0{,}4\,\pi \cdot \xi \cdot i \cdot \frac{b \cdot h}{a}. \quad . \; . \; . \quad (24)$$

Die Kraftlinien N_2 berechnen sich in folgender Weise: Denken wir uns in der Höhe x einen Horizontalschnitt durch die Schenkel gelegt und betrachten wir die Länge einer Kraftlinie als bestehend aus dem Stück a und 2 Viertelskreisen mit dem veränderlichen Radius y, so ist die Länge einer Kraftlinie gleich $a + \pi \cdot y$. Ist die Höhe des Schnittes wiederum dx, so ist der Querschnitt einer unendlich kleinen Kraftröhre $dx \cdot dy$, also der Widerstand einer Kraftröhre $\frac{a + \pi \cdot y}{dx \cdot dy}$.

Die magnetomotorische Kraft an der Stelle x ist wiederum:

$$F \cdot \frac{x}{h},$$

demnach die Kraftlinienzahl pro Kraftröhre:

$$\frac{F \cdot x \cdot dx \cdot dy}{h \cdot (a + \pi y)}.$$

Von den beiden Seiten geht nun eine Anzahl Kraftlinien aus, die sich durch Summation der Kraftröhren ergibt:

$$d N_2 = 2 \cdot \int_0^c \frac{F \cdot x \cdot dx \cdot dy}{h \cdot (a + \pi y)} = 2 \cdot \frac{F \cdot x}{h} \cdot \int_0^c \frac{dx \cdot dy}{a + \pi y} =$$

$$\frac{2F \cdot x \cdot dx}{h}\int_0^c \frac{dy}{a + \pi y} = \frac{2F \cdot x \cdot dx}{h} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \Big[\ln (a + \pi y)\Big]_0^c$$

$$= \frac{2F \cdot x \cdot dx}{h} \cdot \frac{2{,}3}{\pi} \cdot \Big[\log (a + \pi c) - \log a\Big].$$

Für den ganzen Schenkel von der Länge h folgt dann:

$$N_2 = \int_0^h \frac{2F \cdot x \cdot dx}{h} \cdot \frac{2{,}3}{\pi} \cdot \Big[\log (a + \pi c) - \log a)\Big] =$$

$$F \cdot h \cdot \frac{2{,}3}{\pi} \cdot \log \left(\frac{a + \pi \cdot c}{a}\right).$$

Endlich:

$$N_2 = 0{,}4\, \pi\, \xi \cdot i \cdot h \cdot \frac{2{,}3}{\pi} \cdot \log \left(\frac{a + \pi \cdot c}{a}\right) =$$

$$0{,}92 \cdot \xi \cdot i \cdot h \cdot \log \left(\frac{a + \pi \cdot c}{a}\right) \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (25)$$

In ähnlicher Weise ergibt sich für die Kraftlinien N_3:

$$N_3 = 0{,}92 \cdot \xi \cdot i \cdot b \cdot \log \left(\frac{a + \pi \cdot c}{a}\right) \quad . \; . \; . \; . \quad (26)$$

Indem Kapp den magnetischen Widerstand des Kraftlinienweges von den linearen Dimensionen der Maschine abhängig macht, gelangt er zu folgender Formel für den Streufluß pro Pol:

$$N_S = \frac{AW}{\varrho} = \frac{AW}{\frac{k \cdot \sqrt{p}}{\sqrt{l \cdot d}}} = \frac{AW \cdot \sqrt{l \cdot d}}{k \cdot \sqrt{p}} \quad . \; . \; . \; . \quad (27)$$

In dieser Formel bezeichnet AW die Ampèrewindungszahl für den Anker und die Luft, p die halbe Polzahl, l die Länge und d den Durchmesser des Ankers in cm. Der Faktor k liegt nach Kapp bei Außenpolmaschinen zwischen 0,35 und 0,55. Diese Formel gilt aber nur unter folgenden Bedingungen:

Die Abmessungen und die Gestalt der Maschinen müssen solche sein, daß sie ohne weiteres als ein Vielfaches einer zweipoligen Maschine gleicher Type gelten kann. Der Ankerdurchmesser der 2 p-poligen Maschine muß p mal so groß sein als der der zweipoligen, die Polbreite, die Länge und Breite der Magnete muß in beiden Fällen dieselbe sein. Endlich muß die Entfernung von Polkante zu Polkante dieselbe sein.

17. Die Erregung der Wechselstrommaschinen.

Die Erregung des Magnetfeldes der Wechselstrommaschinen kann in verschiedener Weise erfolgen. Man hat z. B. versucht, einen Teil des von der Maschine gelieferten Wechselstromes mit Hülfe eines Schleifringkommutators in Gleichstrom umzuwandeln. Eine solche Anordnung zeigt Fig. 63. Doch wird hierdurch der Wirkungsgrad des Generators verschlechtert, da die Kommutation nicht ohne Verluste vor sich geht. Man wird vielmehr die Wechselstrommaschine stets fremd erregen, und zwar kann man sich hierzu einer Akkumulatorenbatterie oder einer kleinen

Gleichstrommaschine [illegible] Anordnung ist die üblichere. Die Gleichstrommaschine [illegible] entweder mit der Generatorwelle direkt gekuppelt sein, [illegible] sie [illegible] Riemen oder Zahnräderübersetzung von der Generatorwelle aus angetrieben werden. Die direkt gekuppelte, besonders die [illegible] angesetzte Erregermaschine stellt eine äußerst einfache Anordnung dar. Sie hat aber den nicht zu unterschätzenden Nachteil, daß bei [illegible] Vor- oder Nacheilen der Generatorwelle auch der Anker der Gleichstrommaschine beschleunigt oder verzögert wird. Ein solches Vor- oder Nacheilen des Wechselstromankers hat, wie später gezeigt werden wird, stets eine Vergrößerung und Verminderung der elektromotorischen Kraft zur Folge, welche Änderung dann noch bei direkter Kupplung durch die gleichzeitig im gleichen Sinne sich ändernde Gleichstromspannung vermehrt wird. Bei Riemenübertragung werden die Tourenschwankungen der Generatorwelle durch den Riemen absorbiert, so daß die Gleichstromseite unabhängig vom Generator bleibt.

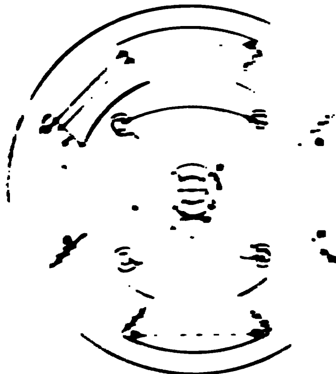


Fig. 63.

Die naheliegende Anordnung ist nun die, daß man für jede Maschine eine eigene Erregermaschine vorsieht. So zeigt Fig. 64 die

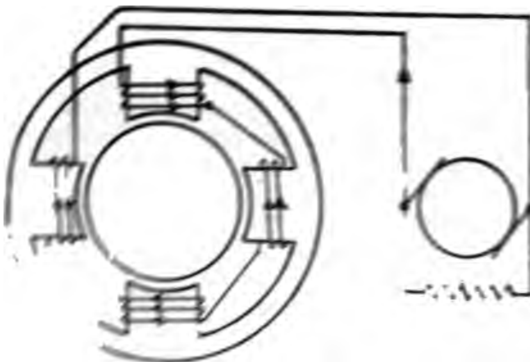


Fig. 64.

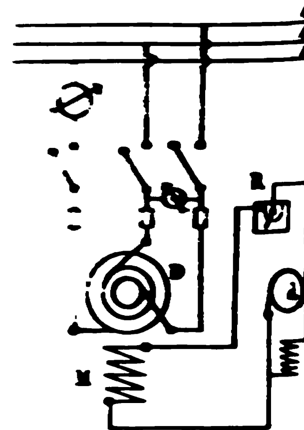


Fig. 65.

Schaltung für die Erregung einer Wechselstrommaschine, während Fig. 65 eine Drehstrommaschine mit Erregung zeigt. Dieselbe zeigt die auf die Sammelschienen des Netzes geschaltete Drehstrommaschine D. Den Erregerstrom liefert die auf der Generatorwelle angebracht zu denkende Gleichstrommaschine G. Die Magnetwickelung der Gleichstrommaschine

ist direkt ohne Vorschaltung von Regulierwiderstand an die Klemmen derselben gelegt. Die Erregung und damit die elektromotorische Kraft des Drehstromgenerators wird dadurch geändert, daß vor die Magnetwickelung desselben ein Regulierwiderstand R eingeschaltet wird. Wenn alle drei Phasen gleich stark belastet sind, so genügen zur Strom- und Spannungsablesung ein Voltmeter und 1 Ampèremeter. Zur Bestimmung der Phasenverschiebung wird zweckmäßig noch ein Wattmeter eingeschaltet.

Anstatt nun jeder Wechselstrommaschine eine besondere Erregerdynamo zu geben, kann man auch in großen Zentralen, in welchen eine Anzahl Wechselstromerzeuger auf das Netz parallel geschaltet sind, für alle diese Maschinen nur eine einzige gemeinsame Erregermaschine vorsehen, die auf eine Speiseleitung geschaltet wird. Eine solche Schaltung zeigt Fig. 66. In derselben sind 3 Drehstrommaschinen parallel auf die Sammelschinen sss geschaltet. Wir nehmen einmal an, jeder Generator leiste einzeln 500 K. W. Schätzen wir für die Erregung 3 % der Nutzleistung, so wäre für jeden Generator eine Erregermaschine von 15 K. W. erforderlich, also für alle 3 zusammen eine einzige Maschine von ~ 50 K. W. Diese 50 K. W. Maschine schalten wir nun auf die Speiseleitung a a, von welcher die Erregerströme für die Generatoren parallel abgenommen werden. Jede Magnetwickelung ist mit einem Regulierwiderstand R versehen. Der Gleichstrommaschine wird dann zweckmäßig noch eine Akkumukatorenbatterie B parallel geschaltet, welche als Reserve dient.

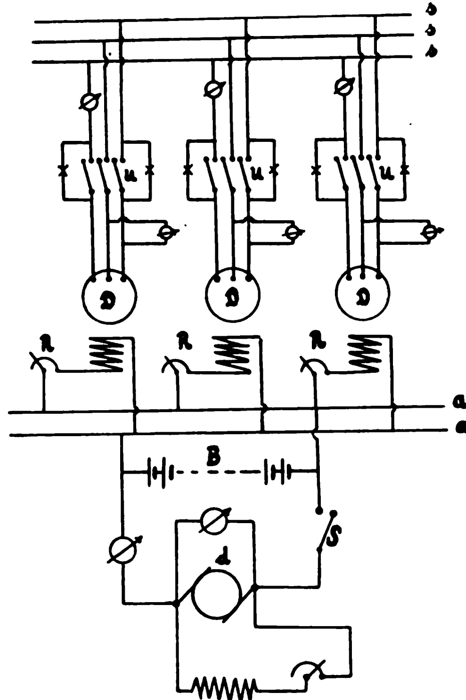


Fig. 66.

Ein wichtiger Vorteil dieser Anordnung springt hier sofort in die Augen. Wir können mit Hülfe der geladenen Batterie die Generatoren bereits vor der Inbetriebsetzung voll erregen. Die Inbetriebsetzung der Generatoren geht hierbei in der Weise vor sich, daß wir das Magnetfeld erregen und dann die Wechselstrommaschinen, wie auch die Erregerdynamo mit der Dampfmaschine antreiben. Ist die Spannung der Erregermaschine gleich der der Speiseleitung geworden, so legt man den Hebel S ein, womit dann die Nebenschlußmaschine die Erregung, als auch die Ladung der Batterie übernehmen kann.

Die Ausschaltung eines Generators geht in einfachster Weise vor sich, indem man mit Hülfe von R seine Erregung abstellt.

Die Vorteile einer solchen Anordnung gegenüber derjenigen, bei welcher jeder Generator eine eigene Erregermaschine erhält, lassen sich, wie folgt, zusammenfassen:

1. Die Generatoren können vor der Inbetriebsetzung voll erregt werden.
2. Die Bedienung der Anlage ist einfach und übersichtlich.
3. Die Batterie ist nebenbei für die Nacht- und Notbeleuchtung zu verwenden.
4. Auch der Vorzug der Billigkeit dürfte dieser Anordnung zuzuerkennen sein trotz der Zusatzkosten für die Batterie, für die ja im andern Falle doch ein Ersatz vorhanden sein müßte. Eine 50 K. W. Maschine stellt sich sowohl im Anschaffungspreis, als auch in den Betriebskosten billiger als 3 kleine 15 K. W. Maschinen.

Da die Ankerrückwirkung der Wechselstrommaschinen während einer Periode fortwährend wellenförmig fluktuiert, so hat auch der Erregerstrom keinen absolut konstanten Wert. Er verläuft vielmehr in umgekehrtem Sinne wie die Ankerrückwirkung nach einer wellenförmigen Kurve.

Bei direkter Kuppelung haben sich Erregermaschinen mit Kompoundwickelung am besten bewährt.

18. Die Regulierung der Maschinenspannung.

Um die Klemmenspannung der Wechselstrommaschinen regulieren, beziehungsweise konstant halten zu können, reguliert man die Erregung. Die zu einer bestimmten äußern Belastung und bestimmter Phasenverschiebung erforderliche Erregerstromstärke ergibt sich aus dem Diagramm Fig. 57, indem man die Ampèrewindungszahl X_1 durch die Windungszahl pro Polpaar dividiert.

Man verwendet in der Regel 2 Regulierwiderstände, von denen der eine als Nebenschlußregulator der Erregerdynamo dient, während der andere vor die Magnetwickelung des Generators geschaltet wird. Mit dem ersteren Widerstand werden die gröberen Spannungsschwankungen ausgeglichen, während mit letzterem die feine Einstellung erfolgt. Die einzelnen Widerstandsstufen müssen derart sein, daß jede Stufe die gleiche Spannung verzehrt.

Die Größe des Nebenschlußregulators der Erregerdynamo läßt sich leicht mit Hülfe der Fig. 67 bestimmen. I ist die statische Charakteristik der Nebenschlußmaschine, während Kurve II die Abhängigkeit des äußern Stromes vom Erregerstrom darstellt. Kurve III entsteht dadurch, daß als Abszisse die äußere Belastung der Wechselstrommaschine aufgetragen wird, während auf der Ordinate die von der Gleichstrommaschine gelieferte Erregung in Amp. angegeben ist. Dann findet man z. B., daß die Erregermaschine, um eine Belastung der Wechselstrommaschine mit 200 Amp. zu ermöglichen, bei einer Klemmspannung von 100 Volt 18 Amp. für die Erregung der Wechselstrommaschine liefern muß, wobei die Gleichstrommaschine ihrerseits 2 Amp. Erregung bedarf.

Die Regulierung kann von der Hand des Maschinisten oder auch selbsttätig durch mechanische Vorrichtungen erfolgen. Von letzteren sind verschiedene Anordnungen in Gebrauch, ihnen allen haftet aber

der Nachteil an, daß sie infolge der Trägheit ihres Systems auf die feinern Spannungsschwankungen nicht genügend reagieren. Sie treten

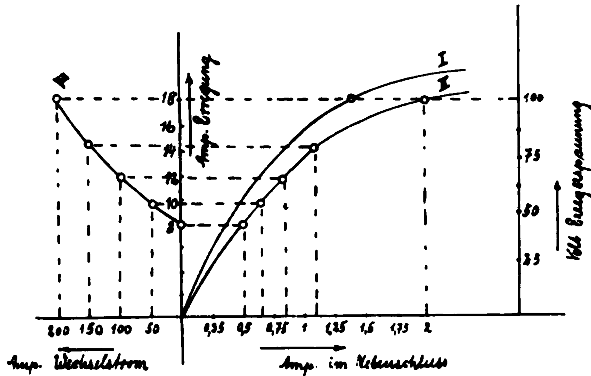
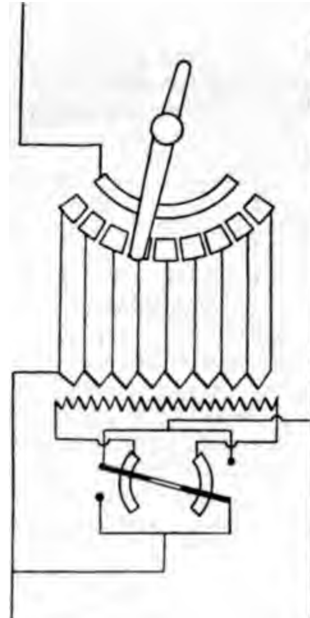


Fig. 67.

niemals momentan in Tätigkeit, sondern erst, wenn die Spannungsänderungen größere Werte erreicht haben.

Auch Drosselspulen und Zusatztransformatoren können zur Spannungsregulierung Verwendung finden. So ist z. B. in Fig. 68 die Schaltung eines Zusatztransformators skizziert, dessen im Hauptstrom liegende Windungen zu- und abschaltbar sind. Die Hochspannungswickelung, welche direkt an der Netzspannung liegt, kann mit Hülfe des Umschalters in verschiedenem Sinne an die Netzleitungen gelegt werden. Dadurch wird erreicht, daß die in der Sekundärspule erzeugte elektromotorische Kraft entweder der Maschinenspannung gleich oder entgegengerichtet ist und so diese verstärkt oder abschwächt. Durch Zu- oder Abschalten einzelner Spulen der Sekundärwickelung läßt sich das gewünschte Maß der Regulierung erreichen.


Fig. 68.

Eine besondere Art der Regulierung der Maschinenspannung von Wechsel- und Drehstrommaschinen ist in Amerika gebräuchlich, indem ähnlich wie bei den Kompound-Gleichstrommaschinen mit Hülfe besonderer Kompoundwickelungen die Spannung der Maschine reguliert wird. So zeigt z. B. Fig. 69 eine Schaltung, bei welcher die Erregerwickelung der Maschine in 2 Teile geteilt ist, in einen größern Teil I, welcher von einer besondern Gleichstromquelle erregt wird, und in einen kleinern Teil II, der von der Gleichstromseite eines rotierenden

Umformers R. U. seinen Strom erhält. Es kommt nun prinzipiell darauf an, eine selbsttätige Spannungsregulierung zu erreichen. Zu dem Zwecke durchfließt der Hauptstrom des Wechselstromgenerators W. G. die Primärwickelung eines Transformators T, während die Sekundärwickelung desselben an den rotierenden Umformer angeschlossen ist und diesen

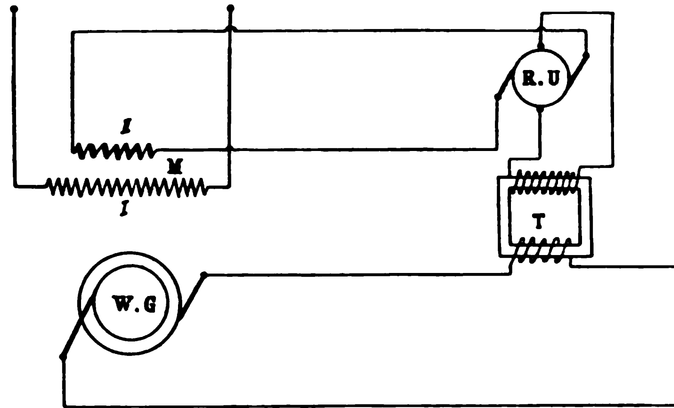


Fig. 69.

antreibt. Man erkennt, daß eine Änderung des Stromes der Wechselstrommaschine den Transformator und den rotierenden Umformer in gleichem Sinne beeinflußt. Der Gleichstrom des Umformers wirkt dann

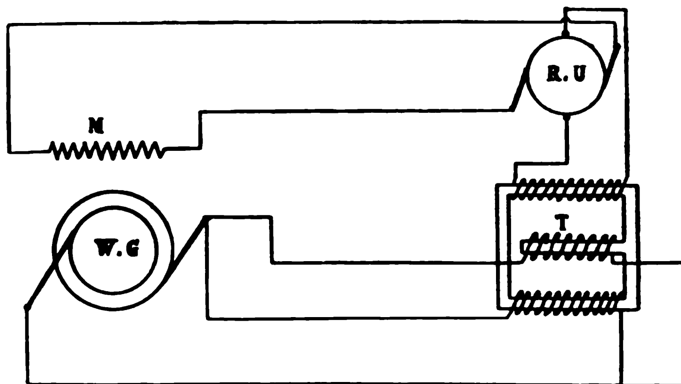


Fig. 70.

. in demselben Sinne auf die Magnetwickelung II. Wird z. B. der Maschinenstrom größer, was im gleichen Augenblick einen größeren Spannungsabfall der Maschine zur Folge hat, so wird auch der Strom des rotierenden Umformers größer und damit die Erregung II verstärkt, sodaß der Spannungsabfall der Maschine kompensiert wird.

In ähnlicher Weise sucht die in Fig. 70 gezeichnete Anordnung eine konstante Maschinenspannung zu erreichen. Der Transformator T besitzt hier einen magnetischen Nebenschluß, auf welchen eine vom Hauptstrome der Maschine durchflossene Spule gewickelt ist. Die eigentliche Primärwickelung des Transformators ist parallel zur Wechselstrommaschine geschaltet. Die Sekundärwickelung betreibt wiederum die Wechselstromseite eines rotierenden Umformers, dessen Gleichstromseite die Magnetwickelung M des Wechselstromgenerators speist. Die Wirkung dieser Anordnung beruht auf der veränderlichen Streuung des gezeichneten Transformators. Ist der Strom in der mittleren Spule schwach, so ist die Streuung des Transformators groß, da sich die Kraftlinien der Primärwickelung zum größten Teil durch den in diesem Falle geringen Widerstand des magnetischen Nebenschlusses schließen. Ist dagegen der Hauptstom stark, so verbietet sich den Kraftlinien der Primärwickelung der Weg durch den magnetischen Nebenschluß, da dessen magnetischer Widerstand infolge der höheren Eisensättigung entsprechend höher

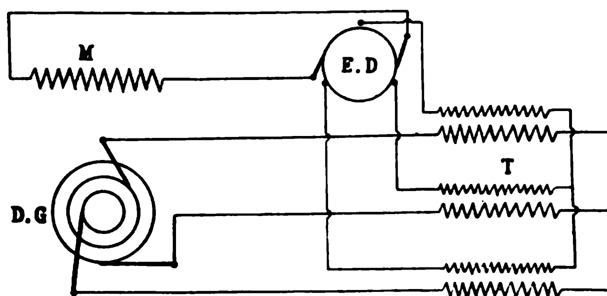


Fig. 71.

geworden ist. Dadurch wird die Sekundärspannung und somit auch die Erregung verstärkt.

Eine dritte Anordnung ist in Fig. 71 skizziert. Die Erregung des Drehstromgenerators D. G. wird von einer auf der Generatorwelle sitzenden Gleichstrommaschine E. D. geliefert. In diesem Falle müssen beide Maschinen gleiche Polzahl besitzen, da gleiche Periodenzahl Bedingung ist. Der Hauptstrom des Generators speist die Primärwickelung eines Drehstromtransformators T. die Sekundärwickelung desselben wird mit ihren 3 Leitungen zu 3 um 120° verschobenen Anschlußpunkten der Erregermaschine geführt. Das hierdurch im Gleichstromanker entstehende Drehfeld setzt sich mit dem Magnetfeld zu einem resultierenden Feld zusammen, wodurch eine entsprechende Änderung des Magnetfeldes des Drehstromgenerators zu stande kommt.

Bei der Konstruktion eines Wechselstromgenerators ist überhaupt weniger darnach zu trachten, daß der Spannungsabfall der Maschine möglichst gering wird, als vielmehr eine in magnetischer und elektrischer Hinsicht voll ausgenutzte Maschine zu erhalten. Abgesehen davon, daß eine Maschine mit absolut konstanter Spannung nicht zu konstruieren ist, bietet eine Maschine mit kleinem Spannungsabfall keine wesentlichen Vorteile vor Maschinen mit größerem Spannungsabfall, da letztere

bedeutend kleiner und billiger gebaut werden können. Man wird daher bei der Berechnung dem Spannungsabfall keine allzu hohe Aufmerksamkeit schenken, die Regulierung der Spannung dabei nach einer der oben beschriebenen Methoden bewerkstelligen.

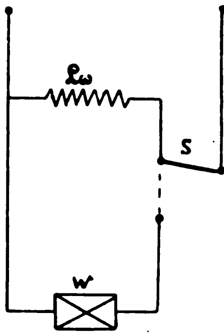


Fig. 72.

Da infolge der hohen Selbstinduktion der Magnetspulen bei Unterbrechung der Erregung leicht hohe Spannungen auftreten, welche die Wickelung durchschlagen können, so ist man gezwungen, beim Abschalten diese Spannungen unschädlich zu machen. Dies kann dadurch geschehen, daß man vor dem Abschalten das Verhältnis zwischen Ohmschem und induktivem Widerstand in dem Erregerkreise möglichst groß macht, also viel Ohmschen Widerstand einschaltet. Die gebräuchlichen Kohleausschalter erfüllen diesen Zweck sehr gut.

Man kann andererseits die Extraspannung mit Hülfe eines Umschalters auf einen Nebenschluß schalten, der nur Ohmschen Widerstand enthält. Wird in Fig. 72 der Umschalter S auf den freien Kontakt (puntierte Lage) gelegt, so ist der induktive Stromkreis unterbrochen und der Strom verläuft durch den Ohmschen Widerstand w.

Kap. III.

Das Arbeiten mehrerer Wechselstrommaschinen auf denselben Stromkreis.

19. Die Wechselstrommaschine mit konstanter Klemmspannung bei variabler Erregung.

Die früher gemachte Unterscheidung zwischen eigentlicher innerer Selbstinduktion und Ankerrückwirkung wollen wir der Einfachheit halber für die folgenden Untersuchungen wieder fallen lassen, indem wir unter der inneren Selbstinduktion des Ankers die Summe aus der eigentlichen Selbstinduktion und der Ankerrückwirkung verstehen. Bezeichnen wir diese gesamte innere Selbstinduktion mit E_S, so würde demnach gelten:

$$E_S = L \omega \cdot i \cdot$$

Aus dieser Gleichung läßt sich der scheinbare Selbstinduktionskoeffizient L berechnen, wenn E_S bekannt ist:

$$L = \frac{E_S}{\omega \cdot i} \cdot$$

Wir setzen für die Folge auch diesen Selbstinduktionskoeffizienten als konstant voraus.

Wir machen ferner die auch zutreffende Annahme, daß bei einer größern Anzahl parallel auf ein Netz arbeitender Maschinen das Zu- oder Abschalten einer einzelnen Maschine keine wesentliche Spannungsänderung an den Netzschienen hervorruft. Es ist dann die Frage zu beantworten: Bei welchem Betriebszustande liefern sämtliche parallel geschaltete Maschinen bei gleichem Strom die gleiche Leistung?

Zu dem Zwecke haben wir die Beziehungen festzustellen, welche zwischen Leistung, Stromstärke, Phasenverschiebung und Erregung bestehen.

Beschreibt man in Fig. 73 mit der elektromotorischen Kraft E der Maschine als Radius den äußeren Kreis, mit der Klemmspannung e dagegen den inneren Kreis und nimmt den nach links gerichteten horizontalen Radius als Richtung des Stromes an, so stellt uns OA in einem passend gewählten Maßstabe den Ohmschen Spannungsverlust im Anker dar, der sich aus i und w_a ergibt und mit dem Strome gleichgerichtet sein muß. Senkrecht dazu, aber um 90° nacheilend, ist die Ankerselbstinduktion E_s gerichtet. Dieselbe muß aufgehoben werden durch eine gleich große, aber entgegengesetzte Ordinate OB. Aus $OA = i \cdot w_a$ und $OB = E_s$ ergibt sich dann als Resultierende OC = dem gesamten innern Spannungsverlust. Es kann sich nun die Stromstärke beliebig ändern, stets muß die resultierende Ankerverlustspannung in die Richtung des Vektors OC fallen, da eine doppelte Vergrößerung der Stromstärke sowohl eine Verdoppelung des Ohmschen Verlustes, als auch bei dem konstant vorausgesetzten Selbstinduktionskoeffizienten eine Verdoppelung der induktiven inneren Spannung nach sich zieht.

Faßt man nun die Klemmspannung e als Funktion des Netzes, also als eine der elektromotorischen Kraft entgegengerichtete und von ihr zu überwindende Größe auf, so läßt sich die gesamte Verlustspannung im Anker als Resultierende aus E und e darstellen. Aus dem Kräfteparallelogramm ergibt sich dann E nach Größe und Richtung in der Strecke OE, die Klemmspannung e dagegen als Strecke OF. Die Winkel, welche diese beiden Strecken mit den Abszissen bilden, stellen die Phasenverschiebung gegenüber dem Strome dar.

Fig. 73.

Das Diagramm bietet nun auch die Möglichkeit, in einfacher Weise die Leistung der Maschine anzugeben. Die Phasenverschiebung zwischen der elektromotorischen Kraft und dem Strome ist φ, also ist die gesamte elektrische Leistung der Maschine, abgesehen von den Reibungs-, Hysteresis- und Foucaultverlusten, $E \cdot i \cdot \cos \varphi$ oder $E \cdot \cos \varphi \cdot i$. Nun stellt uns die Strecke OB ebenfalls in einem bestimmten Maßstabe die Stromstärke i dar, die Projektion OG dagegen ist gleich $E \cdot \cos \varphi$. Das Produkt beider, also das Rechteck OGKB ist demnach ein Maß für die gesamte elektrische Leistung der Maschine.

Ebenso stellt Rechteck OHJB die äußere Nutzleistung der Maschine dar. Die Differenz der beiden Rechtecke OGKB und OHJB muß dann die im Anker verlorene, in Joulesche Wärme umgesetzte Leistung angeben und diese muß, da OA die Projektion von OC ist, gleich dem Rechteck AOBC sein.

Wenn nun an der antreibenden Dampfmaschine weder die Dampfspannung, noch die zeiteinheitlich zugeführte Dampfmenge geändert wird, so bleibt die von der Dampfmaschine zugeführte Leistung konstant; dann ist aber auch die von der Wechselstrommaschine erzeugte Gesamtleistung konstant, also auch das Produkt $OG \times OB$ konstant. Der Punkt K liegt demnach auf einer Kurve, für welche das Produkt der Koordinaten sämtlicher Punkte stets denselben Wert ergibt, und das ist eine gleichseitige Hyperbel.

Das Diagramm läßt sich nun auch benutzen, um zu einer gegebenen Klemmspannung und beliebiger Stromstärke die elektromotorische Kraft zu ermitteln. In Fig. 74 sei die Klemmspannung dieselbe wie in Fig. 73, die Stromstärke sei dagegen durch die Strecke OB gegeben. Ziehen wir durch B eine Parallele zur Abszissenachse, so schneidet diese als innere Verlustspannung die Strecke OC ab und trifft die Hyperbel in K. Da der Punkt E auf der Senkrechten KG liegen muß, so findet sich derselbe, indem wir von K aus die Senkrechte auf die Abszisse fällen

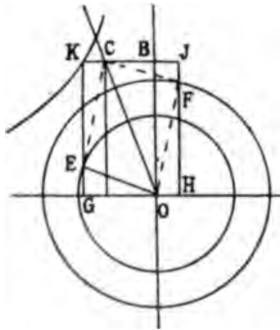


Fig. 74.

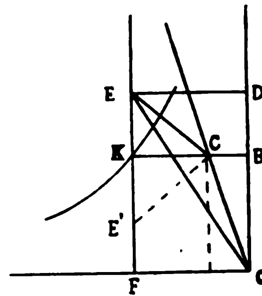


Fig. 75.

und von C aus mit e einen Kreis beschreiben. Die Strecke OE stellt dann die elektromotorische Kraft der Maschine dar. Wir erkennen, daß dieselbe jetzt sogar kleiner wie die Klemmspannung geworden ist. Die auf die Maschine übertragene Leistung, sowie die gesamte von ihr erzeugte Leistung ist dieselbe geblieben wie vorher, aber ihre äußere Nutzleistung ist sehr klein geworden, da bei der relativ großen Stromstärke der Joulesche Ankerverlust sehr groß geworden ist. Dabei ist natürlich der Wirkungsgrad der Maschine sehr schlecht geworden. Der Wirkungsgrad der Maschine wird dagegen dann am höchsten sein, wenn bei der betreffenden zugeführten Leistung die äußere Nutzleistung ein Maximum, die Ankerverluste dagegen ein Minimum werden. Dies ist der Fall, wenn die Phasenverschiebung außen gleich Null wird, und läßt sich im Diagramm folgendermaßen zeigen: Ist uns in Fig 75 der gesamte Spannungsverlust im Anker wiederum durch OC gegeben und schneidet die Parallele zur Abszisse durch den Punkt C die Hyperbel im Punkte K, so ergibt sich die elektromotorische Kraft E, wenn man durch K eine F[illegible]ur Ordinate zieht und mit der Klemmspannung e als Radius um [illegible]reis schlägt. Dieser Kreis schneidet die Senk-

rechte in 2 Punkten, nämlich E und E'. Der obere E gilt für die sogenannte Übererregung, der untere E' für Untererregung. Da die Strecke EC die Klemmspannung, OC den Spannungsverlust im Anker angibt, muß OE die elektromotorische Kraft E für den betreffenden Fall darstellen. Ziehen wir noch durch E die Parallele zur Abszisse ED, so haben wir in dem Dreieck ODE das frühere Spannungsdiagramm der Wechselstrommaschine vor uns.

Tragen wir nun in Fig. 76 auf der Strecke OB die Stromstärken auf, indem wir uns den Ampèremaßstab aus den Gleichungen:

$$Es = L\omega \cdot i$$

$$i = \frac{E_s}{L \cdot \omega}$$

berechnen und führen die in Fig. 75 für den einen Punkt B gezeigte Konstruktion für eine Anzahl von Werten der Stromstärke durch, so erhalten wir eine Anzahl Punkte, deren Verbindung uns die in Fig. 76 gezeichnete Kurve liefern. Die Strahlen der Kurve geben zu jedem Wert der Stromstärke 2 Werte der elektromotorischen Kraft an.

Nur in einem Falle erhalten wir einen einzigen Schnittpunkt E. Das ist der Fall, wenn die Klemmspannung mit dem Strome gleich gerichtet ist: e = EC. (Fig. 77.) In diesem Falle arbeitet die Maschine mit der normalen Erregung E = OE. Hier sind die Ankerverluste ein Minimum, die Nutzleistung ein Maximum, also arbeitet die Maschine mit dem günstigstem Wirkungsgrad bei der betreffenden zugeführten Leistung.

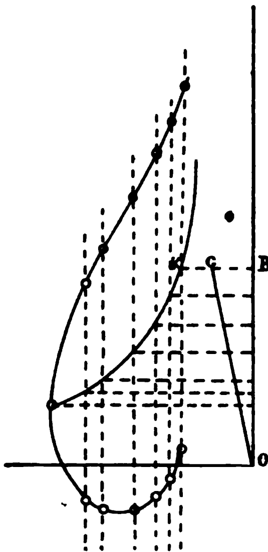


Fig. 76.

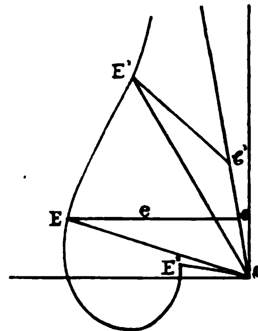


Fig. 77.

Rückt der Vektor der elektromotorischen Kraft nach oben, z. B. OE', so arbeitet die Maschine mit Übererregung. Es tritt dann größere Phasenverschiebung zwischen E und i und ebenfalls Phasenverschiebung zwischen e und i auf. Die Maschine liefert dann zum großen Teil wattlosen Strom.

Rückt dagegen der Vektor auf der Kurve nach unten, so arbeitet die Maschine mit Untererregung. Die Phasenverschiebung zwischen

Klemmspannung und Strom wird dabei negativ, d. h. der Vektor des Stromes eilt der Klemmspannung voraus. Eine solche negative Phasenverschiebung kann dazu verwandt werden, um im Netz vorhandene positive Phasenverschiebung auszugleichen. Dabei darf aber die Untererregung nicht zu weit getrieben werden. E'' ist der letzte Punkt der Kurve, für den sich das Diagramm noch zeichnen läßt, d. h. OE'' ist diejenige kleinste Erregung, bei welcher die Maschine die ihr von der Dampfmaschine zugeführte mechanische Leistung noch in elektrische Leistung umsetzt. Würde die Erregung noch mehr verringert werden, so würde die Maschine, wie in einem späteren Abschnitt gezeigt werden wird, außer Tritt fallen, wodurch die ganze Anlage gestört werden würde. Bemerkenswert ist noch, daß sowohl bei Über- als auch bei Untererregung die Stromstärke größer wird. Bei der normalen Erregung haben wir die kleinste Stromstärke.

An der Hand des Diagramms können wir jetzt auch leicht die Beziehungen der elektromotorischen Kraft zur Klemmspannung verfolgen. Bei positiver Phasenverschiebung ist E stets größer wie e. Sowie nun aber die Phasenverschiebung negativ wird, der Strom also der Klemmspannung vorauseilt, tritt eine Änderung in der Wirkung der Ankerampèrewindungen ein. Letztere wirken nämlich von nun ab nicht mehr den Magnetkraftlinien entgegen, sondern verstärken dieselbe und dies immer mehr, je kleiner die elektromotorische Kraft wird. Dadurch erhalten wir bei Untererregung zunächst einen Punkt, wo die elektromotorische Kraft gleich der Klemmspannung geworden ist. Bei weiterer negativer Phasenverschiebung wird dann die elektromotorische Kraft kleiner wie die Klemmspannung. Die konstante Klemmspannung wird von nun ab dadurch erzielt, daß die elektromotorische Kraft und die elektromotorische Gegenkraft, herrührend von den Ankerampèrewindungen, sich zur Klemmspannung als Resultierenden zusammensetzen.

Den Winkel der Phasenverschiebung erhalten wir im Diagramm, indem wir jeweils durch den Punkt C eine Horizontale ziehen. Der äußere Phasenverschiebungswinkel φ liegt dann zwischen dieser Horizontalen und dem Vektor der Klemmspannung. Einen übersichtlichen Einblick in das Verhältnis zwischen elektromotorischer Kraft und Stromstärke gewährt das Diagramm Fig. 78, die sogenannte V-Kurve. Dieselbe wird erhalten aus Diagramm Fig. 76, indem man die Stromstärken als Ordinaten, die zugehörigen elektromotorischen Kräfte als Abszissen aufträgt. Die Kurve gilt natürlich nur für eine ganz bestimmte Leistung. Die günstigste Erregung ist diejenige, bei welcher der Ankerstrom am kleinsten und damit der Wirkungsgrad am größten ist. Sowohl bei Verkleinerung, als auch bei Vergrößerung der Erregung steigt die Stromstärke, aber nicht die Leistung der Maschine. Es steigen vielmehr nur die Ankerverluste und die Phasenverschiebung. Es wird hieraus auch deutlich, daß die Leistung einer Wechselstrommaschine nicht durch Änderung der Erregung, sondern nur durch Änderung der zugeführten Dampfmaschinenleistung geändert werden kann.

Es dürfte jetzt noch zu entscheiden sein, ob die Maschine nun unter allen Umständen mit der günstigsten Erregung arbeiten soll. Dies hängt nun von der Art der äußern Netzbelastung ab. Ist die Netzbelastung stark induktiv, so würde sich diese induktive Belastung einzig

und allein auf die übrigen Maschinen verteilen müssen, wenn unsere Maschine nur Wattstrom lieferte. Das würde zwar einen guten Wirkungsgrad der einzelnen Maschine, aber einen schlechten für die übrigen Maschinen bedingen. Damit also der Wirkungsgrad der ganzen Anlage bei den betreffenden Betriebsverhältnissen am günstigsten wird, wird es zweckmäßig sein, daß sich sämtliche Maschinen zum gleichen Teil an der Lieferung der wattlosen Ströme beteiligen.

20. Das Parallelarbeiten.

Vernachlässigen wir, was bei modernen Maschinen immer statthaft ist, den kleinen Ohmschen Spannungsabfall im Anker, so läßt sich eine parallel zu anderen Maschinen aufs Netz arbeitende Wechselstrommaschine durch ein Diagramm nach Fig. 79 in ihrem Verhalten darstellen. Der gesamten Magneterregung X_1 entspricht die elektromotorische Kraft der Maschine E, der aus der Felderregung und der Ankerrückwirkung X_a resultierenden Erregung X entspricht die Klemmspannung der Maschine

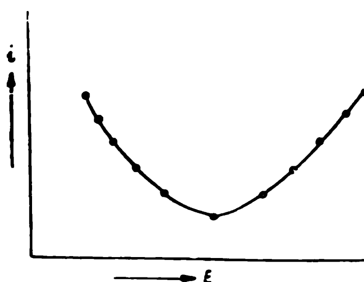


Fig. 78.

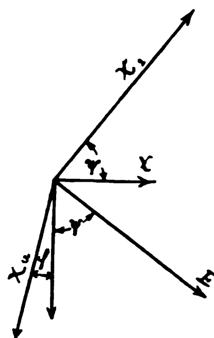


Fig. 79.

oder die Netzspannung. In die Richtung X_a fällt auch der Vektor des Ankerstromes. Letzterer bildet mit der Klemmspannung e den Winkel φ.

Ist die elektromotorische Kraft der Maschine gleich der Netzspannung, wobei dieselben als entgegengesetzte Größen zu denken sind, so ist der Winkel ψ gleich Null und auch die Leistung der Maschine gleich Null. Die Leistung nimmt dann mit zunehmendem Winkel ψ zu und erreicht ihr Maximum für $\psi = \sim 90^0$. Trägt man die Leistung für verschiedene Werte von ψ in ein Polarkoordinatensystem ein (Fig. 80), so ergibt sich als Kurve der Leistung ein angenäherter Kreis. Wird der Ankerwiderstand vollständig vernachlässigt, so ist die Kurve ein genauer Kreis, wie folgende Überlegung zeigt:

In Fig. 81 ist OB die elektromotorische Kraft, OA = e die Netzspannung und OC die Ankerselbstinduktion $E_s = L\omega \cdot i$. Der Ankerwiderstand wird vernachlässigt.

Die Leistung unserer Maschine ist nun:

$$P = E \cdot i \cdot \cos \varphi = OB \cdot i \cdot \cos \varphi.$$

Da $i = \frac{E_s}{L\omega}$, so ist auch:

$$P = OB \cdot \frac{E_s}{L\omega} \cdot \cos \varphi.$$

Ferner ist: $DA = E_s \cdot \cos \psi$.

Und: $DA = OA \cdot \sin \psi = e \cdot \sin \psi$.

Also: $P = \frac{OB}{L\omega} \cdot OA \cdot \sin \psi$.

Oder: $P = \frac{E}{L\omega} \cdot e \cdot \sin \psi$.

Setzt man E als konstant voraus, was wegen der Ankerrückwirkung nicht der Fall ist, so ist die Leistung dem Sinus des Winkels zwischen elektromotorischer Kraft und Netzspannung direkt proportional.

Da auf den Akerwiderstand keine Rücksicht genommen wird, so ist der Quotient $\frac{E}{L\omega}$ gleich dem Ankerstrom bei kurzgeschlossener Maschine:

$$\frac{E}{L\omega} = i_o.$$

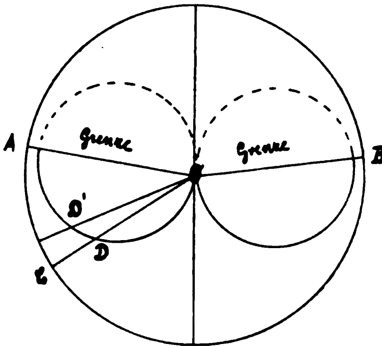


Fig. 80.

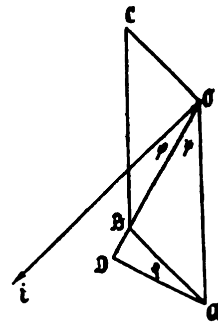


Fig. 81.

Demnach: $P = e \cdot i_o \cdot \sin \psi$.

Die maximale Leistung, welche die Maschine aufnehmen kann, ist:

$$P_{max} = e \cdot i_o$$

Dabei ist $\measuredangle\ \psi = 90^0$.

Dieser maximalen Leistung entspricht der Durchmesser des Kreises in Fig. 80.

Dabei gilt der linke Kreis für den Fall, daß die Maschine als Generator arbeitet, der rechte dagegen, wenn die Maschine als Motor läuft.

Für $\psi = O$ ist auch die Leistung Null.

Für alle anderen Werte von ψ ist die Leistung gegeben durch die Sehnen OD. Die Phasenverschiebung zwischen den beiden Spannungen liegt zwischen der Vertikalen und den Vektoren.

Das Leistungsdiagramm setzt uns nun in den Stand, die Verhältnisse bei Parallelbetrieb leicht verfolgen zu können. Nimmt z. B. die Leistung der Dampfmaschine plötzlich zu, indem die Dampfspannung oder die zugeführte Dampfmenge aus irgend einem Grunde zunimmt,

so erfährt die Wechselstrommaschine eine plötzliche Voreilung, wodurch der $\sphericalangle\ \psi$ zwischen elektromotorischer Kraft und Klemmspannung größer wird. Die Vergrößerung des Winkels ψ bringt aber nach Fig. 80 eine Vergrößerung der Generatorleistung mit sich, bis vollständiges Gleichgewicht zwischen den Maschinen eingetreten ist. Der Wechselstromgenerator hält also die Dampfmaschine genau im Takt, sodaß die Tourenzahl konstant bleibt.

Ebenso liegen die Verhältnisse dann, wenn die Dampfmaschinenleistung plötzlich etwas nachläßt. Dann bleibt auch die Wechselstrommachine zurück, der $\sphericalangle\ \psi$ wird kleiner und damit die Leistung kleiner.[1])

Es liegt nun in der Natur der Sache, daß die oben besprochene Zunahme der elektrischen Leistung bei Zunahme der mechanischen Leistung nicht ins Unendliche fortgehen kann, sondern daß auch hier eine streng bestimmte Grenze vorhanden ist. Dieser Fall ist in Fig. 80 durch den mit „Grenze" bezeichneten Durchmesser gekennzeichnet. Dieser Durchmesser stellt nach früherem die maximale Leistung dar. Aus dem Diagramm erhellt, daß bei weiterer Zunahme des $\sphericalangle\ \psi$ über diesen Grenzfall hinaus die von der Wechselstrommaschine erzeugte Leistung wieder kleiner wird. Wird dieser Grenzfall überschritten, so erhält die Dampfmaschine immer mehr Übergewicht, da die Generatorleistung fortwährend kleiner wird. Die Dampfmaschine geht durch, die Wechselstrommaschine fällt aus dem Tritt und das ganze Gleichgewichtssystem der Anlage ist gestört. Dabei treten dann starke Ausgleichströme zwischen den einzelnen Maschinen im Netz auf, wobei natürlich das Drahtmaterial übermäßig beansprucht wird.

Um ein sicheres automatisches Regulieren der Maschinen zu gewährleisten und damit ein Außertrittfallen unmöglich zu machen, darf der $\sphericalangle\ \psi$ erfahrungsmäßig nicht über $20 \div 40^0$, bezogen auf die zweipolige Maschine, betragen:

Bei 2p Polen gilt dann:

$$\sphericalangle\ \psi \leqq \frac{20 \div 40^0}{p}.$$

21. Die synchronisierende Kraft.

Wir haben im vorigen Paragraphen gesehen, daß innerhalb gewisser Grenzen die Wechselstrommaschinen ihre Antriebsmaschine genau auf konstante Tourenzahl halten. Für die Wechselstrommaschinen bedeutet dies eine allen gemeinsame konstante Periodenzahl. Vollzieht sich auch der Wechsel in den Vorzeichen der elektromotorischen Kräfte aller Maschinen zur gleichen Zeit, so sagt man, die Maschinen laufen in Synchronismus zu einander. Die Ursache dieses Synchronismus ist die „synchronisierende Kraft" des Ankers. Die synchronisierende Kraft des Ankers ist es, welche bei Änderung der Dampfmaschinengeschwindigkeit durch entsprechende Änderung der Generatorleistung die alte Periodenzahl und damit den Synchronismus wiederherzustellen bestebt ist.

---

1) Wird der Generator kurzgeschlossen, so wird seine Leistung Null, da die Phasenverschiebung 90^0 wird, also $\cos \varphi = 0$. Die Dampfmaschine geht dann durch.

Wenn wir das Leistungsdiagramm Fig. 80 betrachten, so erkennen wir, daß die synchronisierende Kraft von dem ∢ ψ abhängt. Ist ψ klein, so ist die synchronisierende Kraft groß, da eine kleine Zunahme von ψ bereits eine relativ große Zunahme der Leistung und damit ein schnelles Synchronisieren bedingt. Ist dagegen ψ groß (in der Nähe von 90°), so ruft eine Zunahme von ψ nur eine geringe Zunahme der Leistung hervor. Das bedeutet eine kleine synchronisierende Kraft. Die Maschine reagiert kaum noch auf die Leistungsänderung der Dampfmaschine und verhält sich in diesem Zustande fast indifferent.

Sowie nun 2 der parallel arbeitenden Generatoren Differenzen in den Antriebstourenzahlen aufweisen (gleiche Polzahl vorausgesetzt), tritt infolge der damit verbundenen Phasenverschiebung zwischen ihren elektromotorischen Kräften ein Ausgleichstrom im Netz auf, dessen Größe durch die vektorielle Differenz der beiden elektromotorischen Kräfte bestimmt ist. Die Maschine mit der größeren elektromotorischen Kraft muß also eine dieser Differenz entsprechende Mehrleistung aufbringen. Die synchronisierende Kraft ist von diesem Ausgleichstrom abhängig. Sind die beiden elektromotorischen Kräfte gleich groß und ist keine Phasenverschiebung zwischen ihnen vorhanden, so ist auch kein Ausgleichstrom möglich. Ist dagegen zwischen den beiden gleichen elektromotorischen Kräften Phasenverschiebung vorhanden, so entsteht ebenfalls ein Ausgleichstrom infolge der aus beiden phasenverschobenen elektromotorischen Kräften resultierenden elektromotorischen Kraft E_k. Ist α der Phasenverschiebungswinkel zwischen E_1 und E_2 ($E_1 = E_2 = E$), so ist (Fig. 82):

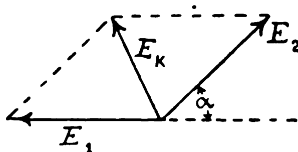


Fig. 82.

$$E_k = 2 \cdot E \cdot \sin\frac{\alpha}{2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (28)$$

Der Ausgleichstrom selbst hat dabei den Wert:

$$J = \frac{E_k}{\sqrt{w^2 + (L\omega)^2}}.$$

w bezeichnet den Widerstand der beiden Anker und der Außenleitung.

Ist ψ der Phasenverschiebungswinkel zwischen E_k und J, so ist für kleine Winkel α der Ausgleichseffekt:

$$P_a = E_k \cdot J \cdot \cos\psi \quad \ldots\ldots \quad (29)$$

Die synchronisierende Kraft wird nun dann am größten sein, wenn der Ausgleichseffekt ein Maximum ist. Hopkinson hat gezeigt, daß dies für $\psi = 45^0$ eintritt, wobei dann sein muß:

$$\operatorname{tg} 45^0 = \frac{L\omega}{w} = 1.$$

Die synchronisierende Kraft ist also dann am größten, wenn die Induktanz der Maschine gleich dem Ohmschen Widerstande ist. Diese Bedingung läßt sich allerdings praktisch nicht erreichen. Die Induktanz in modernen Maschinen ist etwa 2 bis 10 mal so groß wie der Ohmsche Widerstand.

Es ist ohne weiteres klar, daß sich Maschinen mit geringer Polzahl oder mit geringer Periodenzahl besser zum Parallelbetrieb eignen als

solche mit großer Polzahl. Bei letzteren genügt schon eine Voreilung von wenigen räumlichen Graden, um eine große elektrische Phasenverschiebung hervorzurufen.

22. Das Parallelschalten.

Bevor eine Wechselstrommaschine aufs Netz parallel zu anderen Maschinen geschaltet werden kann, sind folgende 3 Bedingungen zu erfüllen:

1. Die Spannungen der parallel zu schaltenden Maschinen müssen gleich groß sein.
2. Die zuzuschaltende Maschine muß synchron mit den bereits arbeitenden Maschinen laufen.
3. Die Maschinen müssen alle gleiche Phase haben, d. h. sie müssen alle zu gleicher Zeit den maximalen oder den Nullwert erreichen.

Die Spannungen liest man an den betreffenden Voltmetern ab. Der Synchronismus der Maschinen ist erreicht, wenn sie alle die gleiche Periodenzahl haben, was durch Messung der Tourenzahl festgestellt wird. Es muß dann sein:

$$\nu = \frac{p \cdot n}{60}$$ wenn ν die Periodenzahl pro Sekunde und n die Tourenzahl pro Minute bedeutet.

Um zu erkennen, ob die Maschinen gleiche Phase haben, bedient man sich der Phasenlampen oder der Phasenvoltmeter. Dieselben können dabei entweder nach Fig. 83 oder 84 geschaltet werden. Da die

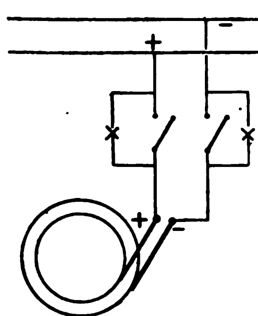


Fig. 83.

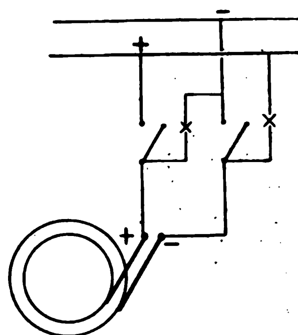


Fig. 84.

Spannungen des Netzes und der Maschine gleich groß sind, so haben wir bei der Anordnung in Fig. 83 Phasengleichheit, wenn die Lampen vollständig erloschen sind, da dann 2 gleich große Spannungen direkt gegen einander geschaltet sind. In Anordnung Fig. 84 ist dagegen Phasengleichheit eingetreten, wenn die Lampen am hellsten aufleuchten. Dann sind die beiden Spannungen direkt hinter einander geschaltet. Bei Einschaltung von Voltmetern an Stelle der Glühlampen ist Phasengleichheit vorhanden, je nachdem der Ausschlag Null oder ein Maximum ist.

Die Tourenzahl läßt sich nun nicht so genau einstellen, daß die Periodenzahl des Netzes absolut gleich der der Maschine ist, vielmehr

brennen die Lampen abwechselnd hell und dunkel mit einer Periodenzahl, die gleich der Differenz der Periodenzahlen des Netzes und der Maschine ist. Man reguliert dann bei der Anordnung Fig. 83 die Tourenzahl so lange, bis die Lampe eine längere Zeit dunkel als hell brennt, und schaltet dann im Augenblick des Erlöschens ein. Nach dem Einschalten sorgt dann die synchronisierende Kraft dafür, daß absolut genaue Periodenzahl sich herstellt.

Die so eingeschaltete Maschine läuft nun vorläufig völlig unbelastet, ohne sich an der Stromlieferung zu beteiligen, und ihre Antriebsmaschine führt nur den Leerlaufeffekt zu. Es ist nun von Wichtigkeit, sich darüber klar zu werden, wie die Maschine zur Abgabe von Strom ans Netz gezwungen werden kann. Dabei ist zunächst zu bemerken, daß eine jede Wechselstrommaschine ohne weiteres als Generator, wie auch als Motor betrieben werden kann, daß also unsere Maschine in diesem interimistischen Zustande noch unentschieden darüber ist, ob sie als Generator oder als Motor laufen soll.

Als Generator würde sie Strom ins Netz liefern, als Motor dagegen solchen aus dem Netz entnehmen und dabei ihre Antriebsmaschine antreiben. Nehmen wir einmal als Antriebsmaschine der Wechselstrommaschine einen Nebenschlußmotor an. Es ist nun schon wiederholt darauf hingewiesen worden, daß eine Änderung der Erregung der Wechselstrommaschine keine Änderung der Leistung hervorbringt. Um die Leistung zu variieren, sind wir vielmehr darauf angewiesen, die zugeführte Leistung zu verändern. Um nun die Leistung des Nebenschlußmotors zu erhöhen, schwächen wir seine Erregung ab. In diesem Falle kann dies auf die Tourenzahl keinen Einfluß ausüben, da diese durch die Wechselstrommaschine konstant gehalten wird. Infolge der schwächeren Erregung sinkt nur die elektromotorische Gegenkraft des Motors, was einen stärkeren Ankerstrom zur Folge hat. Dadurch überwiegt die Gleichstromseite über die Wechselstromseite, der Anker der Wechselstrommaschine wird solange vorgetrieben, bis die Leistung der Wechselstrommaschine der Antriebsmaschine das Gleichgewicht hält, Siehe Fig. 80. Damit ist dann die Wechselstrommaschine zum Generator geworden und liefert Strom ins Netz.

Umgekehrt haben wir die Erregung des antreibenden Nebenschlußmotors zu verstärken, wenn wir die Wechselstrommaschine als Motor arbeiten lassen wollen. Dann steigt nämlich die elektromotorische Gegenkraft des Motors, der Ankerstrom wird kleiner und der Anker der Wechselstrommaschine bleibt zurück. Es wandert dann der Leistungsvektor in Fig. 80 in den rechts gezeichneten Kreis hinein, die Maschine nimmt Strom aus dem Netz auf und läuft als Motor. Sie treibt nunmehr die Gleichstrommaschine als Generator. Eine solche als Motor laufende Einphasenmaschine nennt man „Synchronmotor".

23. Das Pendeln der Wechselstrommaschinen.

Da die Umfangsgeschwindigkeit der Dampfmaschinenkurbel keine konstante, sondern eine periodisch veränderliche ist, so ist auch das von der Dampfmaschine auf die Wechselstrommaschine übertragene Drehmoment periodischen Schwankungen unterworfen. Wir können uns nun

diese durch fortwährende Beschleunigungen und Verzögerungen hervorgerufene ungleichförmige Bewegung des Polrades zerlegen in eine gleichförmige rotierende Bewegung und in eine pendelartig hin und hergehende Bewegung. Das Polrad schwingt also gerade wie ein physisches Pendel hin und her, während es gleichzeitig eine rotierende Bewegung vollführt.

Diese Bewegung wird nun dem Polrad von der Dampfmaschine mitgeteilt, sodaß wir die entstehenden Schwingungen als erzwungene Schwingungen bezeichnen können.

Infolge der periodischen Beschleunigungen und Verzögerungen (Voreilen und Nacheilen) kommt nun der Ankerdraht in eine falsche Lage zu dem Pol. Eine Voreilung ist immer mit einer Vergrößerung, eine Nacheilung mit einer Verkleinerung der Generatorleistung verbunden. Dem letzteren wirkt aber die synchronisierende Kraft des Ankers entgegen. Erfährt z. B. das Polrad von der Dampfmaschine eine beschleunigte Bewegung nach vorwärts, so treibt im nächsten Augenblick die synchronisierende Kraft das Magnetrad wieder in seine Nullage zurück. Infolge der Trägheit geht diese Schwingung sogar noch über die Nullage nach rückwärts hinaus, worauf wiederum die synchronisierende Kraft das Polrad nach vorne treibt usw.

Diese letzteren Schwingungen sind nun nur abhängig von der Größe der synchronisierenden Kraft und dem Trägheitsmoment sämtlicher rotierenden Teile, sodaß dieselben als Eigenschwingungen zu bezeichnen sind.

Wir haben es demnach bei diesen eigentümlichen Erscheinungen mit zwei übereinander gelagerten Schwingungen, den erzwungenen und den Eigenschwingungen zu tun. Solche übereinander gelagerte Schwingungen bezeichnet man in der Physik als „Interferenzschwingungen".

Die Zeitdauer einer Eigenschwingung des Polrades läßt sich berechnen aus der für das physische Pendel gültigen Beziehung:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{J}{D}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (30)$$

Hierin ist:

T die Schwingungsdauer,
J das Trägheitsmoment der bewegten Massen,
D das Drehmoment pro Bogeneinheit, genannt „Direktionskraft."

Die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde läßt sich dann darstellen durch:

$$n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{D}{J}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (31)$$

Diese Interferenzschwingungen sind nun für die Maschine solange nur von untergeordneter oder gar keiner Bedeutung, als die Schwingungszeiten der erzwungenen und eigenen Schwingungen wesentlich von einander verschieden sind. In diesem Falle wirken sich nämlich die Schwingungen ganz oder zum Teil entgegen, sodaß sie sich entweder vollständig oder teilweise aufheben.

Von Bedeutung werden diese Schwingungen für die Maschine erst dann, wenn die beiden Schwingungszeiten annähernd oder, was aller-

Aus dem gleichen Grunde werden auch Maschinen mit massiven Polkernen weniger zum Pendeln neigen, als solche, deren Pole aus lamellierten Blechen bestehen.

24. Der Antrieb der Wechselstrommaschinen.

Als Antriebsmaschinen für Wechselstromgeneratoren kommen in erster Linie Dampfmaschinen und Turbinen in Betracht, seltener Gasmotore. Für kleine Anlagen empfehlen sich auch Dampfturbinen oder schnellaufende Dampfmaschinen, die beide fast gar keine Bedienung erfordern. Für kleinere Leistungen bis 150 K. W. kann der Antrieb mittels Riemen erfolgen. Seilübertragung wird bis etwa 300 K. W. Leistung verwendet. Für größere Leistungen, oft aber auch schon für innerhalb dieser Grenzen fallende, wird direkte Kuppelung der Antriebsmaschine mit dem Generator angeordnet.

Da sich die Riemen verhältnismäßig schnell ausdehnen, ist bei Riemenantrieb stets die Wechselstrommaschine mit Spannschlitten auszuführen. Für langsam laufende Maschinen wird Zahnradübertragung ausgeführt.

Als Dampfmaschinen kommen nur mehrcylindrige Maschinen in Betracht, die einen möglichst gleichmäßigen Gang besitzen. Dem Ungleichförmigkeitsgrad der Maschinen ist die höchste Aufmerksamkeit zu schenken. Derselbe soll bei direkter Kuppelung höchstens $\frac{1}{250}$ sein, während man sich bei Riemenübertragung mit einem Ungleichförmigkeitsgrad von $\frac{1}{150}$ begnügen kann, da der schlüpfende Riemen einen großen Teil der Schwankungen absorbiert.

Bei kleinern Leistungen kann die Riemenscheibe neben dem Lager der Wechselstrommaschine freitragend angebracht werden. Für größere Leistungen erhält der Generator 3 Lager, zwischen zweien ist dann die Riemenscheibe aufgesetzt.

Das Schwungrad, das bei Parallelbetrieb besonders starken Beanspruchungen ausgesetzt ist, ist entsprechend schwer und kräftig zu halten.

Die Veränderung der Leistung geschieht durch einen vom Schaltbrett aus betätigten Elektromotor, der auf einem Konsol der Regulatorsäule sitzt. Mit Hülfe einer Schneckenradübersetzung verschiebt derselbe ein am Regulator angebrachtes Laufgewicht, wodurch die Regulatorkugeln entweder gehoben oder gesenkt worden, je nachdem der Motor in der einen oder andern Richtung rotiert.

Kap. IV.

Leistung, Effektverluste und Erwärmung der Wechselstrommaschinen.

25. Leistung der Wechselstrommaschinen.

Bei einer einphasigen Wechselstrommaschine ist die Nutzleistung;

$$P = e \cdot i \cos \varphi \quad \ldots \ldots \quad (32)$$

Hierin bezeichnet:

e die Klemmspannung,
i den Strom,
φ den Phasenverschiebungswinkel zwischen Klemmspannung und Strom.

Für Zweiphasenmaschinen gilt:

$$P = \sqrt{2} \cdot e\, i \cdot \cos\varphi = 1{,}42 \cdot e \cdot i \cos\varphi \quad . \quad . \quad . \quad 33$$

Für die Dreiphasenmaschine ist:

$$P = \sqrt{3} \cdot e \cdot i \cos\varphi = 1{,}73 \cdot e \cdot i \cdot \cos\varphi \quad . \quad . \quad . \quad 34$$

Unter e ist dabei die Spannung zwischen 2 Phasen verstanden, die sogenannte Netzspannung. i ist der Strom in einer Netzleitung. Die Formel gilt sowohl für Dreieck-, wie für Sternschaltung; bei Dreieckschaltung ist die Netzspannung gleich der Phasenspannung, dagegen der Netzstrom gleich $\sqrt{3} \times$ Phasenspannung ist.

Bei Gleichstromwickelungen, denen Wechselstrom entnommen wird, berechnet sich die Stromstärke in einer Außenleitung nach der Formel:

$$i = 2 \cdot \sin\frac{\pi}{p'} \cdot i_a \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (35)$$

Darin bezeichnet:

i die Stromstärke in der Außenleitung,
i_a die Stromstärke im Anker zwischen 2 Schleifbürsten,
p′ die Anzahl der Phasen.

Das Verhältnis zwischen der Gleichstromleistung und der Wechselstromleistung eines gegebenen Ankers ist durch folgende Gleichung bestimmt:

$$P_w = \frac{p'}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot \sin\frac{\pi}{p'} \cdot Pg \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (36)$$

Darin ist:

Pw die Wechselstromleistung,
Pg die Gleichstromleistung.

Allgemein läßt sich die Leistung einer p′-Phasenmaschine folgendermaßen ausdrücken:

Es sei i′ der Phasenstrom, e′ die Phasenspannung und φ die Phasenverschiebung zwischen diesen, so gilt:

$$P = p' \cdot i' \cdot e' \cdot \cos\varphi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (37)$$

Ist andererseits e die Netzspannung, i der Netzstrom, so wird:

$$P = \frac{p'}{2 \cdot \sin\frac{\pi}{p}} \cdot i \cdot e \cdot \cos\varphi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (38)$$

Für eine geschlossene Wickelung sind in nachstehender Tabelle, die von Steinmetz herrührt, die Werte des Leitungsstromes und des Ankerstromes zwischen 2 Schleifbürsten bei gleichem Wechsel- und Gleichstromeffekt für verschiedene Phasenzahl angegeben:

	Gleichstrom	Wechselstrom 1-phasig	Wechselstrom 3-phasig	Wechselstrom 4-phasig	Wechselstrom 6-phasig	Wechselstrom p'-phasig
i	1,00	1,42	0,943	0,707	0,472	$\frac{2 \cdot \sqrt{2}}{p'}$
i_a	1,00	1,42	0,545	0,5	0,472	$\frac{\sqrt{2}}{p' \cdot \sin \frac{\pi}{p'}}$

Die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung bietet insofern stets einen Nachteil, als infolge der größeren Stromstärke die Effektverluste größer werden und ein größerer Kupferaufwand erforderlich wird. Dadurch wird natürlich die ganze Maschine größer, als der wirklichen Leistung entspricht. Die Dampfmaschine hat natürlich nur die wirkliche Leistung zuzuführen.

Um die Phasenverschiebung im Netz zu kompensieren, kann man sich, wie schon erwähnt, eines oder mehrerer übererregter Synchronmotore bedienen, deren Strom der Spannung voraufeilt. Dadurch wird dann der der Spannung nacheilende Netzstrom gegen die Spannung vorgeschoben und die resultierende Phasenverschiebung verkleinert, eventuell zu Null gemacht. Zweckmäßig läßt man die Synchronmotore nicht leerlaufen, sondern auf eine Transmission arbeiten.

Auch mit Hilfe von Kondensatoren läßt sich die Phasenverschiebung im Netz reduzieren. Doch sind die heute existierenden Kondensatoren für praktischen Betrieb ungeeignet, da die isolierende Zwischenschicht bald anfängt, den Strom zu leiten.

26) Effektverluste in den Wechselstrommaschinen.

Die Effektverluste in Wechselstrommaschinen lassen sich einteilen in:

a) Joulesche Effektverluste,
b) Hysteresis-Verluste,
c) Wirbelstrom-Verluste,
d) Reibungs-Verluste.

Die Jouleschen Effektverluste setzen sich ihrerseits aus den Verlusten im Anker und in der Magnetwickelung zusammen.

Bezeichnet i' den Ankerstrom pro Phase, p' die Phasenzahl und w' den Widerstand einer Phase, so ist der gesamte Effektverlust in den p'-Phasen:

$$P_a = p' \cdot (i')^2 \cdot w' \quad \ldots\ldots\ldots \quad (39)$$

Dabei ist noch zu bemerken, daß w' bei genauen Rechnungen nicht nach der gewöhnlichen Formel $c \cdot \frac{l}{q}$ zu berechnen ist; es ist bei der Berechnung vielmehr auf die sogenannte Oberflächenwirkung bei Wechselstrom Rücksicht zu nehmen. Das um einen Wechselstromleiter zirkulierende Wechselfeld, dessen Stärke von innen nach außen abnimmt, drängt nämlich den Strom mehr nach der äußeren Oberfläche zu, so daß der Leitungsquerschnitt verkleinert, also der Widerstand vergrößert wird.

Bezeichnet w den gewöhnlichen, nach der Formel $c \cdot \frac{l}{q}$ berechneten Gleichstromwiderstand eines Leiters, so ist der Widerstand mit Berücksichtigung genannter Erscheinung:

$$w' = w \cdot \left(1 + \frac{\alpha^2}{12} - \frac{\alpha^4}{180} \pm \cdots\right) \quad \ldots\ldots \quad (40)$$

Die Größe α ist hierin gegeben durch die Beziehung:

$$\alpha = \frac{\mu \cdot l}{w} \cdot \omega \cdot = \frac{\mu \cdot l}{w} \cdot 2\pi \cdot \nu \cdot \quad \ldots\ldots \quad (41)$$

In dieser Gleichung bezeichnet:

μ die magnetische Leitfähigkeit,
l die Länge des Leiters in Metern,
$\omega = 2\pi\nu$ die elektrische Winkelgeschwindigkeit,
ν die Periodenzahl pro Sekunde.

Ist der Durchmesser des Kupferdrahtes d in cm, so gilt:

$$w' = w \cdot \left(1 + 7{,}5 \cdot d^4 \cdot \nu^2 \cdot 10^{-7}\right) \cdot \quad \ldots\ldots \quad (42)$$

Zu dem Effektverlust in der Wickelung ist dann noch bei rotierendem Anker mit Schleifringen der Übergangsverlust an den Schleifbürsten zu addieren. Der Übergangswiderstand ist von der Umfangsgeschwindigkeit abhängig. Niethammer gibt denselben bei Metallbürsten zu 0,01 bis 0,03 Ohm pro qcm und zu 0,1 bis 0,4 Ohm pro qcm bei Kohlebürsten an.

Der in der Magnetwickelung verbrauchte Effektverlust ist:

$$P_m = i_m^2 \cdot \left(w_m + r\right) \cdot \quad \ldots\ldots \quad (43)$$

Hierin bezeichnet:

i_m den Erregerstrom,
w_m den Widerstand der Magnetwickelung,
r den Regulierwiderstand.

Als Hysteresisverluste kommen in Betracht die Hysteresisverluste im Ankereisen und in den Zähnen. Zur Berechnung des Hysteresisverlustes kann die Steinmetzsche Formel dienen:

$$P_h = \eta \cdot \frac{B_{max}^{1,6} \cdot G \cdot \nu \cdot 10^{-4}}{7{,}7} \text{ Watt} \quad \ldots\ldots \quad (44)$$

Dann bezeichnet:

G das Eisengewicht in kg,
Bmax die maximale Induktion,
η den Steinmetzschen Koeffizienten.

Der Steinmetzsche Koeffizient η ist dabei für ein und dieselbe Eisensorte eine Konstante; er liegt zwischen 0,001 und 0,004.

Die Steinmetzsche Formel gilt aber strenggenommen nur für lineare Magnetisierung, wie sie in Transformatoren vorkommt.

Für die zyklische Magnetisierung in Dynamomaschinen sind die nach Steinmetz berechneten Verluste zu klein.

Kapp gibt folgende Tabelle an, welche den Wattverlust pro kg und 100 Perioden bei verschiedener Induktion ausdrückt.

B/1000	2	4	6	8	10	12	15	20
P_h	0,7	1,6	3,3	6	7	12	17	28

Diese Werte sind durch Messungen an Transformatoren bestimmt und ergeben für zyklische Magnetisierung bedeutend zu kleine Werte. Niethammer gibt eine für wirklich drehende Magnetisierung gültige Tabelle, die im folgenden angegeben ist. Für eine andere Periodenzahl als 100 sind die Werte einfach im Verhältnis $\frac{\nu}{100}$ zu reduzieren.

B/1000	2	4	6	8	10	12	15	20
P_h	1	4	8	14	20	27	35	80

Da die Hysteresisverluste sowohl mit der Induktion, als auch mit der Periodenzahl zunehmen, so wird man bei der Wahl der Ankerinduktion zweckmäßig von der Periodenzahl ausgehen, damit die Hysteresisverluste nicht zu hoch werden. Die nachstehende Tabelle gibt einen Anhalt für die Wahl der Ankerinduktion bei verschiedenen Periodenzahlen:

ν	B_a
40	5000 — 8000
50	4500 — 7500
60	4000 — 6500
80	3500 — 5500
100	2500 — 4500
120	2000 — 4000

Am genauesten und am sichersten ist es, wenn man sich vor dem Entwurf von der zu benützenden Eisensorte eine Kurve bestimmt, welche die Hysteresisverluste bei den betreffenden Induktionen angibt.

Zur Berechnung des Wirbelstromverlustes dient die von Kapp aufgestellte Formel:

$$P_w = 0{,}19 \cdot \left(\Delta \cdot \frac{\nu}{100} \cdot \frac{B}{1000}\right)^2 \text{ Watt/kg} \quad . \; . \; . \; . \quad (45)$$

Bei G kg Eisengewicht gilt demnach:

$$P_w = 0{,}19 \cdot G \cdot \left(\Delta \cdot \frac{\nu}{100} \cdot \frac{B}{1000}\right)^2 \text{ Watt} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (46)$$

In diesen Formeln bezeichnet Δ die Blechstärke in Millimetern. Bei guter Unterteilung der Ankerbleche ist der Verlust durch Wirbelströme stets sehr gering. Man berücksichtigt dieselben vielfach dadurch, daß man einen Zuschlag zu den Hysteresisverlusten macht. Die Blechstärke soll 0,3 bis 0,5 mm betragen. Noch dünnere Bleche zu verwenden,

Minimum Oberfläche haben. Während man früher die erforderliche Ankeroberfläche in qcm pro 1 Watt Joulescher Wärme zu 12 ÷ 16 angab, hat man bei unseren modernen, wesentlich kleiner ausgeführten Maschinen diesen Wert auf das Mindestmaß 7 heruntergebracht, d. h. man verlangt bei einem Anker 7 qcm abkühlender Oberfläche pro 1 Watt Joulescher Wärme.

Die Stromdichte im Anker soll 2 ÷ 3 Amp. pro qmm betragen. Neuerdings geht man allerdings über diese Werte noch hinaus, indem man bis zu 4,5 Amp. geht, wobei dann natürlich der Abkühlung erhöhte Aufmerksamkeit zu schenken ist. Bei kleineren Maschinen unter 50 K. W. kann man sogar bei richtig gewählter Ankerinduktion bis zu 6 Amp. gehen.

Die Erwärmung des Kollektors wird hervorgerufen durch die Joulesche Wärme u. die Bürstenreibung. Nimmt man den Bürstenwiderstand für Kohlebürsten, etwa zu 0,4 Ohm pro qcm Bürstenfläche und den Reibungskoeffizienten zu 0,2 an, so gilt:

$$P = 150 \cdot \frac{P_v}{O \cdot (1 + 0,1 \cdot v)} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (55)$$

Darin ist:

P_v der gesamte Wattverlust am Kollektor,

v die Umfangsgeschwindigkeit desselben in m/sec.

Die Stromdichte am Kollektor soll bei Kohlebürsten unter 10 Amp. pro qcm, bei Kupferbürsten unter 30 Amp. bleiben.

Bei Schleifringen kann die Stromdichte bis 20 Amp. pro qcm. Kohlebürsten und bis 60 Amp. pro qcm Metallbürste betragen.

Kap. V.

Die Details der Wechselstrommaschinen.

29. Der Anker.

Die konstruktive Zusammensetzung des Ankers einer Wechselstrommaschine unterscheidet sich nicht wesentlich von derjenigen der Gleichstrommaschine. Der Anker selbst besteht aus einer Anzahl von Eisenscheiben, deren Dicke aus schon früher erwähnten Gründen zwischen 0,3 u. 0,5 mm gewählt wird. Größere Anker erhalten stets Lüftungskanäle, die je nach erforderlichen Anzahl zwischen einzelnen Blechpaketen angebracht und durch besondere Einsatzstücke aufrecht erhalten werden.

Da bei größeren Ankerdurchmessern die aus einem Stück hergestellten Kreisringe sowohl eine ungenügende Ausnützung der Blechtafeln, als auch Schwierigkeiten beim Stanzen der Nuten usw. mit sich bringen, so werden die Ankerbleche in einzelnen Segmenten von gleichem Radius hergestellt und beim Aufbau an der Stoßzelle immer abwechselungsweise etwas übereinander geschoben. Das ganze Blechpaket wird dann durch schmiedeeiserne Bolzen zusammengehalten.

Bei feststehenden Ankern werden die Bleche von einem rund herum laufenden gußeisernen Gehäuse getragen, das mit seitlichen und im Mantel befindlichen Aussparungen zur Ermöglichung einer guten Abkühlung versehen wird. Die Gehäuse der von den Siemens-Schuckertwerken hergestellten Maschinen werden bis zu einem äußeren Durchmesser von 1,60 m ungeteilt, bei Durchmessern über 1,6 bis 7.7 m

zeitweilig und bei noch größerem Durchmesser vierteilig ausgeführt. Die Zusammensetzung des Ankers mit Gehäuse zeigt Fig. 85, 86 u. 86a.

Bei neueren Konstruktionen von Lasche besteht das Gehäuse einfach [aus 2 Wangen, die die Stirnflächen der Ankerbleche umfassen, eine Konstruktion, welche ein und dasselbe Gehäuse für verschiedene

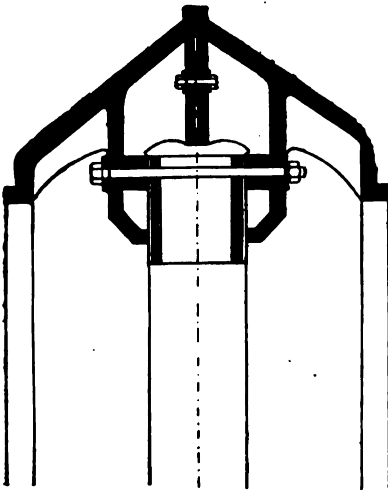


Fig. 85.

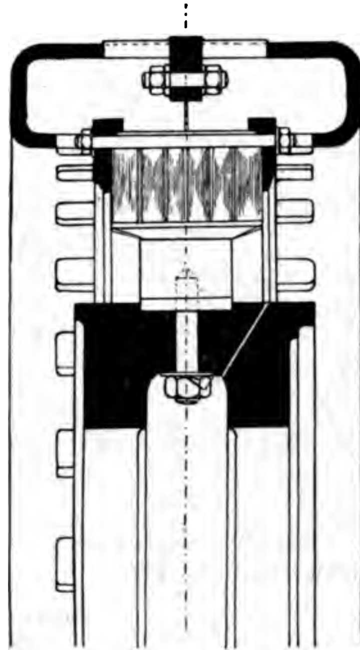


Fig. 86.

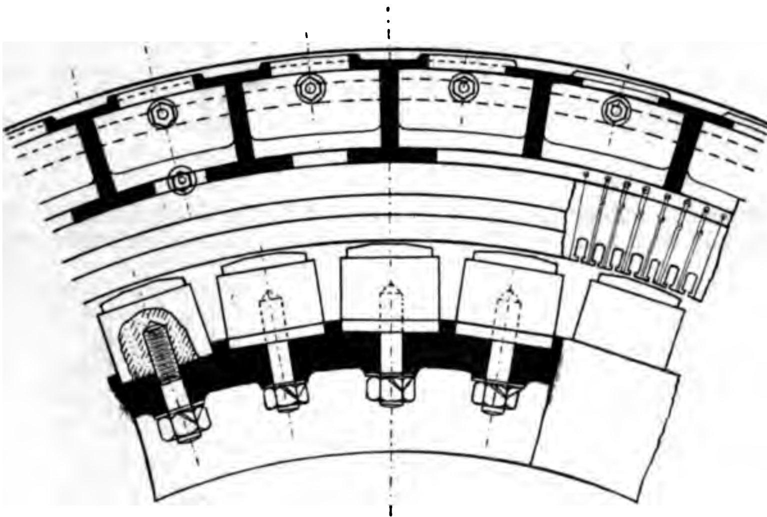


Fig. 86 a.

Ankerbreiten zu benutzen gestattet. Zwei derartige Ausführungen zeigen die Figuren 87 und 88.

Das Gehäuse ist vielfach achsial verschiebbar angeordnet, was eine leichte Revision der Wickelung erforderlichenfalls ermöglicht.

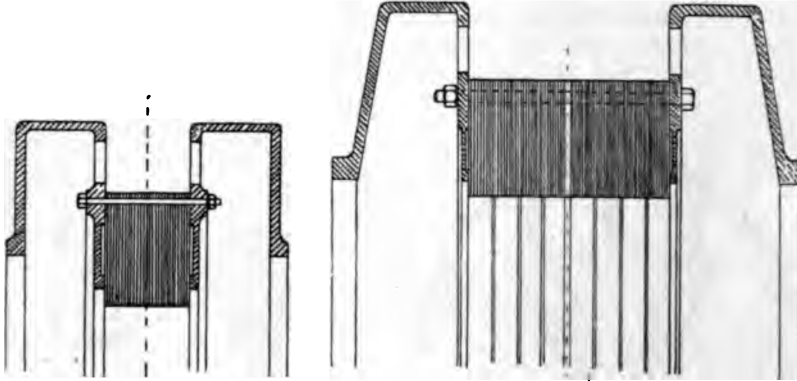


Fig. 87. Fig. 88.

Die Nuten werden entweder als offene, halboffene oder geschlossene Nuten (nach den Fig. 89—93) ausgeführt. Bei offenen Nuten und ro-

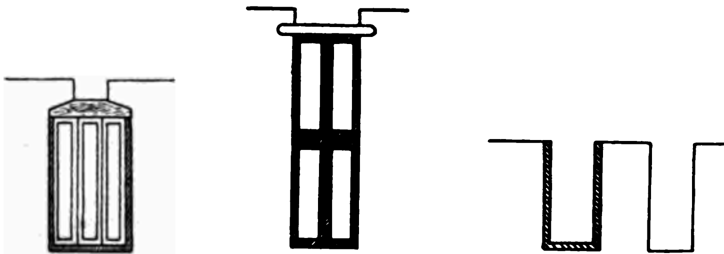


Fig. 89. Fig. 90. Fig. 91.

tierendem Anker werden die Drähte in den Nuten durch Bandagen aus Stahldraht festgehalten. Unter die Bandagen kommt ein Streifen Iso-

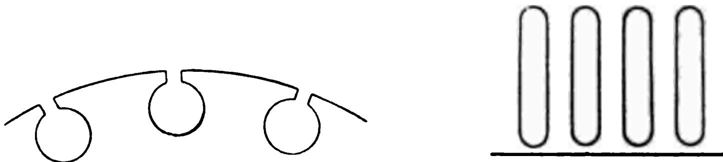


Fig. 92. Fig. 93.

lation von etwa 2,5 cm Breite, während man die Bandagenbreite etwa 2 cm macht. Bei den halboffenen Nuten wird das Herausfallen der

Leiter durch Holzkeile verhindert (Fig. 89). Bei ganz offenen Nuten mit Stabwickelung läßt sich ein Abschließen der Nute ebenfalls mit Holzkeil (nach Fig. 90) ausführen.

Die Nuten sollen zur Verminderung der Streuung möglichst so breit sein, als dies die mechanische Festigkeit und der wegen der Hysteresisverluste erforderliche Zahnquerschnitt zulassen.

Bei Hochspannungswickelungen werden die Leiterbündel in Mikaniröhren bis zu 10 mm Stärke verlegt, wodurch der nutzbare Querschnitt der Nut unter Umständen (bei kleineren Maschinen) bedeutend reduziert wird. Aus diesem Grunde wird es auch oft unmöglich, ein gegebenes kleines Modell für eine bedeutend höhere Spannung umzuwickeln, da die erforderliche Isolation den Wickelraum zu sehr beschränkt, so daß eine Unterbringung der erforderlichen Drahtzahl unmöglich wird.

Über die Wahl des Verhältnisses zwischen Ankerdurchmesser und Ankerbreite dürfte folgendes zu berücksichtigen sein: Ist die Maschine sehr breit, so wird es unmöglich, das Blechpacket mit den erforderlichen langen Bolzen zusammenzuhalten. Andererseits soll auch der Durchmesser der Maschine nicht übermäßig groß genommen werden, da sonst die an der Peripherie gelegenen Teile durch die Zentrifugalkraft zu stark beansprucht werden, außerdem eine Maschine mit großem Ankerdurchmesser hohe Eisenverluste und großen Kupferaufwand mit sich bringt. Bei den neueren Konstruktionen macht sich das Bestreben geltend, den Ankerdurchmesser nur so groß zu wählen, daß sich die Pole mit ihren Wickelungen aufbringen lassen.

30. Die Pole.

Die Pole werden entweder massiv oder aus Blechen hergestellt. Bei Ankern mit geschlossenen oder halbgeschlossenen Nuten werden meistens massive Pole aus Stahlguß benutzt, während bei Verwendung von offenen Ankernuten fast ausschließlich lamellierte Pole verwandt werden. Die Pole werden entweder auf einen Ring, der aus Gußeisen oder Stahlguß besteht und das Joch der Gleichstrommaschinen vertritt, aufgeschraubt, oder die Pole sind mit diesem Ring zusammengegossen und es werden die Polschuhe aufgeschraubt. Auch Verbindungen mit Keil oder Schwalbenschwanz sind möglich, aber nur da anzuwenden, wo ein Verschrauben unmöglich ist. Die Magnetspulen werden gewöhnlich auf der Drehbank fertiggewickelt und dann auf den Kern aufgesetzt. Einige Anordnungen zeigen die Figuren 94—96. Bei der Anordnung Fig. 96 werden die lamellierten Bleche in den ebenfalls geblätterten Ring eingesetzt und alsdann durch 2 Bolzen, die halb im Polkern und halb im Jochring verlaufen, zusammengepreßt.

Bei hoher Umfangsgeschwindigkeit des Polrades ist es zweckmäßig, die Wickelung in der Höhe zu unterteilen, wobei dann die einzelnen Teilspulen noch in besonderer Weise auf den Polen befestigt werden.

Bei Maschinen mit großer Umfangsgeschwindigkeit ist die Magnetwickelung aus Hochkantkupfer herzustellen, wobei die einzelnen Windungen durch Preßspan voneinander isoliert werden.

Eine Beziehung zwischen dem Durchmesser runder Pole und dem Durchmesser des Polrades am Fuße der Pole läßt sich wie folgt aufstellen:

Bezeichnet man die Wickelungshöhe mit h, den Poldurchmesser mit d, den Durchmesser des Rades mit D, so muß sein:

$$D \cdot \pi = (d + 2h + 10)\, 2p \cdot$$

Oder:

$$D = \frac{(d + 2h + 10)\, 2p}{\pi}.$$

Das Verhältnis Polbreite zu Polteilung ist gewöhnlich 0,6 ÷ 0,8. Für den Luftabstand zwischen Anker und Pol findet man je nach der Größe und Art der Maschine sehr verschiedene Werte. Derselbe beträgt für mittlere Maschinen 4 ÷ 8 mm.

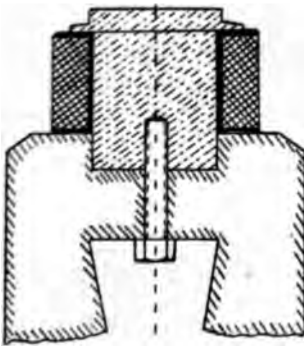


Fig. 94.

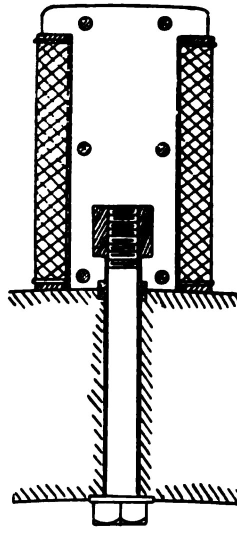


Fig. 95.

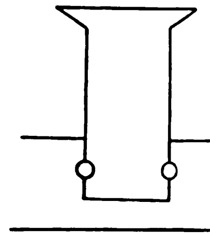


Fig. 96.

Die Induktion in den einzelnen Querschnitten kann bei Wechselstrommaschinen mit 50 Perioden pro Sekunde nach folgender Tabelle gewählt werden:

Anker:	B_a = 4500 ÷ 7500
Zähne:	B_z = 14000 ÷ 18000
Luft:	B_l = 5000 ÷ 10000
Pole:	
a) Gußeisen	B_p = 6000 ÷ 8000
b) Stahlguß oder Schmiedeeisen	B_p = 14000 ÷ 17000
Joch:	
a) Gußeisen	B_J = 4000 ÷ 6000
b) Stahlguß oder Schmiedeeisen	B_J = 10000 ÷ 12000

Die Umfangsgeschwindigkeit des rotierenden Systems beträgt je nach der Größe der Maschine 20 ÷ 40 m/sek.

Das sogenannte „Schwungmoment“ des rotierenden Teils ist das Produkt aus dem Gewicht G des Rotors in Kilogramm, bezw. t und dem Quadrate des Trägheitsdurchmessers D in Metern. Nach der Mechanik ist das Trägheitsmoment J gleich dem Produkt aus Masse mal dem Quadrate des Trägheitsradius, also:

$$J = M \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = \frac{G}{g} \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = \frac{G}{g} \cdot \frac{D^2}{4} \quad \ldots\ldots \quad (56)$$

Hierin bezeichnet:

M die Schwungmasse,
g die Erdbeschleunigung = 9,81 = ∾ 10 ·

Also wird:

$$J = \frac{G \cdot D^2}{10 \cdot 4} = \frac{1}{40} \cdot G \cdot D^2 \quad \ldots\ldots\ldots \quad (57).$$

Da GD^2 das Schwungmoment darstellt, so ist demnach das Trägheitsmoment gleich dem 40sten Teile desselben. Das Schwungmoment wird entweder in $kg\,m^2$ oder in $t\,m^2$ angegeben.

31. Verschiedene Ausführungsarten.

In den Figuren 97 bis 105 sind eine Anzahl von Ausführungsarten der Siemens-Schuckert-Werke, Berlin dargestellt. So zeigt z. B. Fig. 97a die schematische Ausführung einer Maschine, die mit der Antriebsdampfmaschine direkt zusammengebaut werden soll. Die Maschine wird von der Elektrizitätsgesellschaft ohne Grundplatte, Welle und Lager geliefert, welche Bestandteile die Dampfmaschinenfirma zu liefern hat. Dabei gilt die eine Abbildung für große Maschinen, die andere, Fig. 97, für kleine Maschinen. Fig. 98 und 98a zeigt eine Ausführung ohne Grundplatte, mit Flanschwelle und Außenlager für Zusammenbau mit der Antriebsmaschine, ebenfalls für große und kleine Maschinen.

Figur 99 stellt eine Ausführung ohne Grundplatte für Kuppelung mit der Antriebsmaschine dar (Antrieb durch Turbine mit wagerechter Achse), während Fig. 100 dieselbe Maschine für Riemen- oder Seilantrieb ausgeführt zeigt. Die Ausführungen (Fig. 101 und 102) sind mit Grundplatten ausgebildet, Fig. 101 ist für den direkten Antrieb durch Turbine mit wagerechter Achse, Fig. 102 für Riemen- oder Seilantrieb ausgebildet. Die Anordnung Fig. 103 kann sowohl für direkte Kuppelung mit der Antriebsmaschine, als auch für Riemenantrieb verwendet werden, während Fig. 104 mit senkrechter Achse ausgebildet ist und für Kuppelung mit Turbinen mit senkrechter Achse benutzt wird.

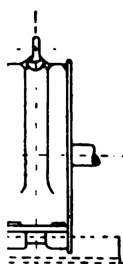


Fig. 97.

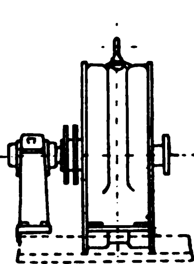


Fig. 98a.

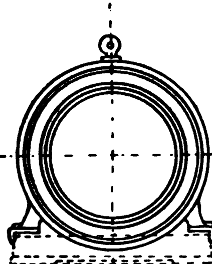


Fig. 98b.

ie nachstehende Tabelle gibt einige Angaben über die wichtigsten n dieses Modells bei den verschiedenen Leistungen:

Modell M D G der Siemens-Schuckert-Werke.

g . .	Touren pro Min.	Kraftbedarf bei cos $\varphi = 1$	Wirkungsgrad bei cos $\varphi = 1$	Erregung Effekt	Erregung Höchste Spannung
. W.	1500	0,9 PS	75 %	0,90 KW	110 Volt
„	1500	1,8 „	77 %	0,14 „	„ „
„	1500	4,4 „	78 %	0,27 „	„ „
„	1500	5,1 „	80 %	0,30 „	„ „
„	1000	4,3 „	80 %	0,4 „	„ „
„	1000	8,3 „	82 %	0,6 „	„ „
„	1000	14,5 „	84 %	0,8 „	„ „
„	1000	23,8 „	86 %	1,0 „	„ „

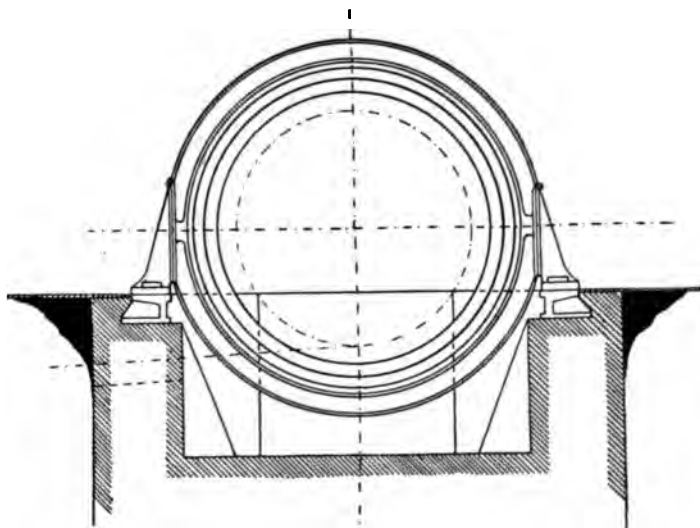


Fig. 99.

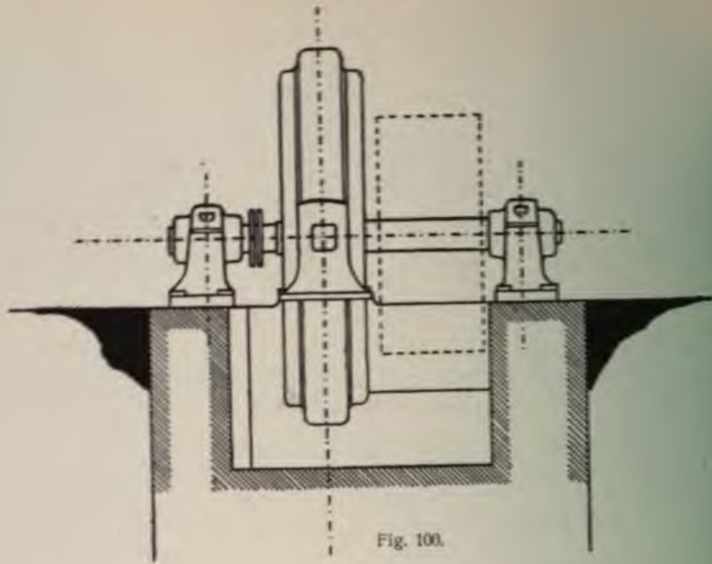


Fig. 100.

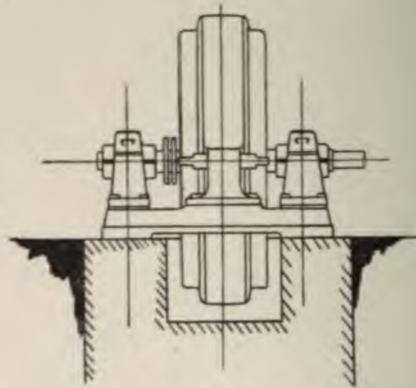


Fig. 101.

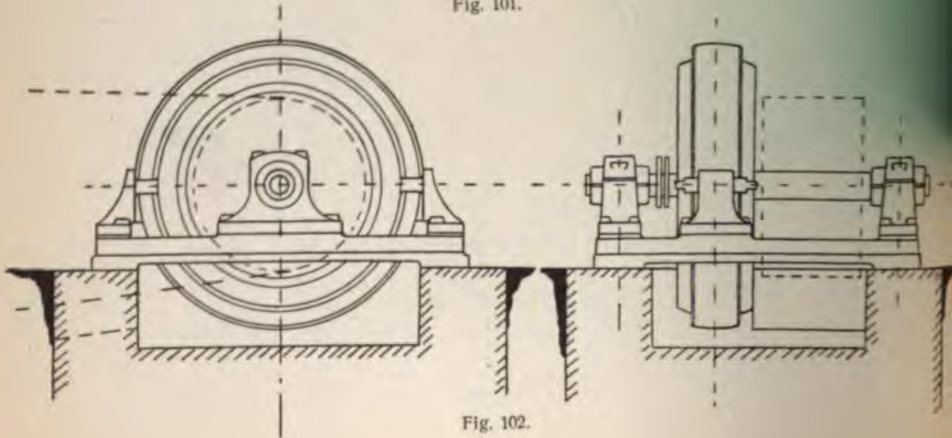


Fig. 102.

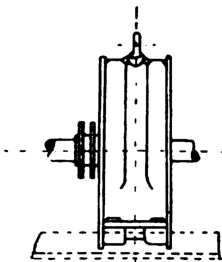


Fig. 97.

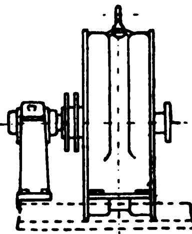


Fig. 98a.

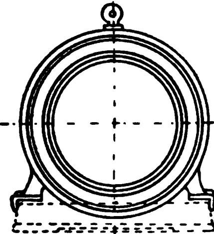


Fig. 98b.

Die nachstehende Tabelle gibt einige Angaben über die wichtigsten Größen dieses Modells bei den verschiedenen Leistungen:

Modell M D G der Siemens-Schuckert-Werke.

Leistung . .	Touren pro Min.	Kraftbedarf bei cos $\varphi = 1$	Wirkungsgrad bei cos $\varphi = 1$	Erregung Effekt	Erregung Höchste Spannung
0,5 K. W.	1500	0,9 PS	75 %	0,90 KW	110 Volt
1 „	1500	1,8 „	77 %	0,14 „	„ „
2,5 „	1500	4,4 „	78 %	0,27 „	„ „
3 „	1500	5,1 „	80 %	0,30 „	„ „
2,5 „	1000	4,3 „	80 %	0,4 „	„ „
5 „	1000	8,3 „	82 %	0,6 „	„ „
9 „	1000	14,5 „	84 %	0,8 „	„ „
15 „	1000	23,8 „	86 %	1,0 „	„ „

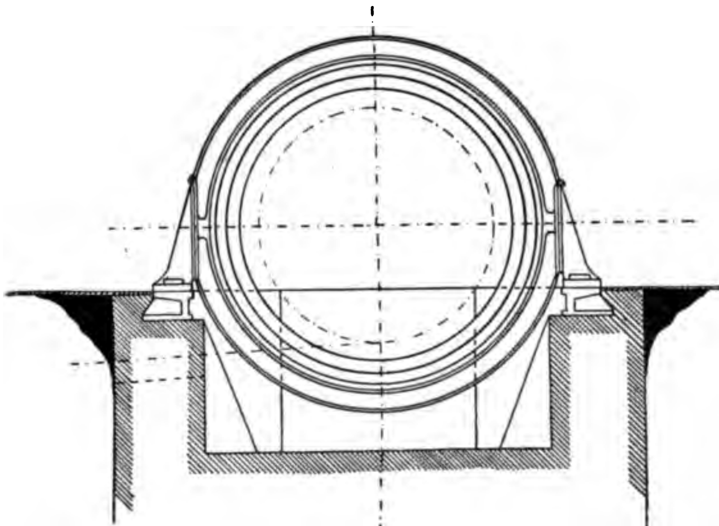
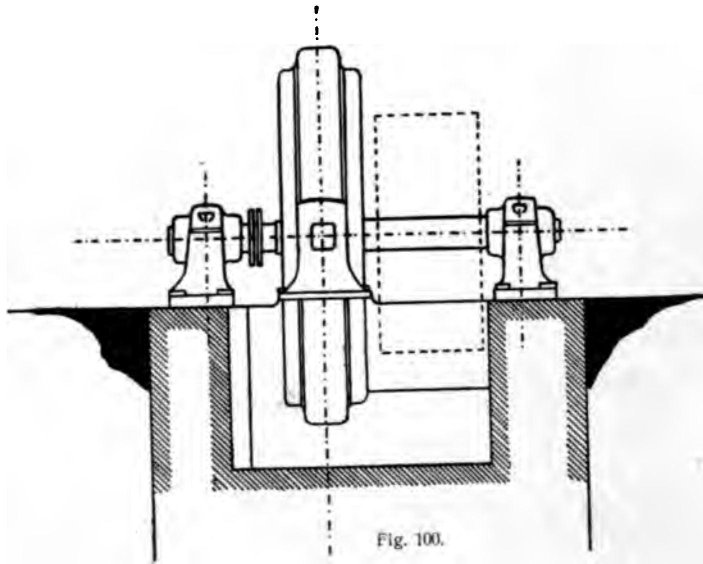
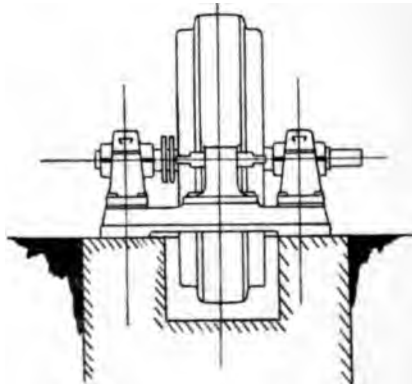
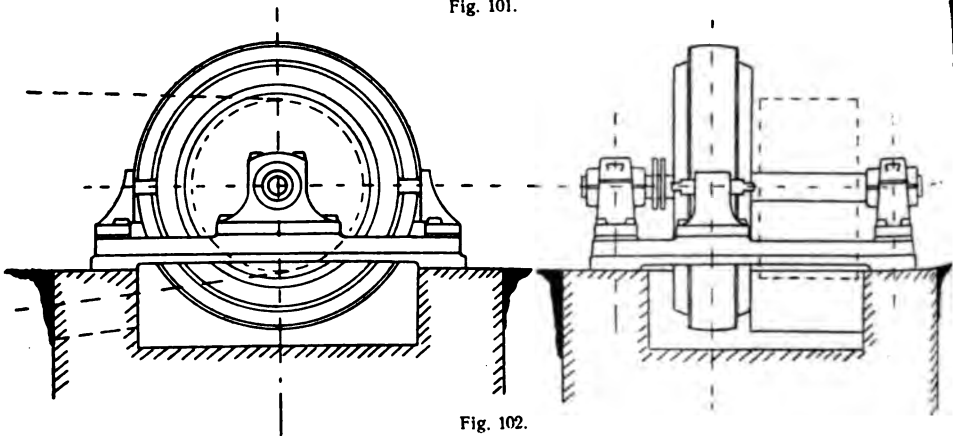


Fig. 99.


Fig. 100.


Fig. 101.


Fig. 102.

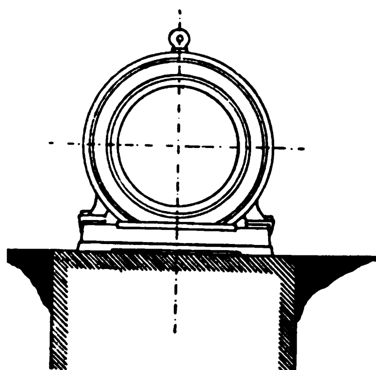


Fig. 103.

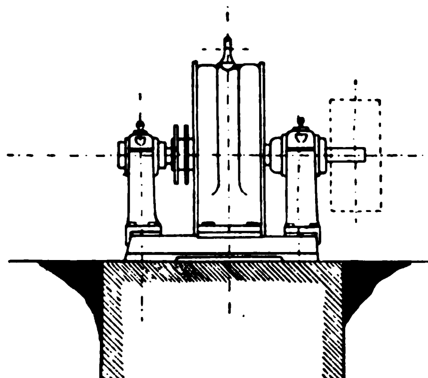


Fig. 103a.

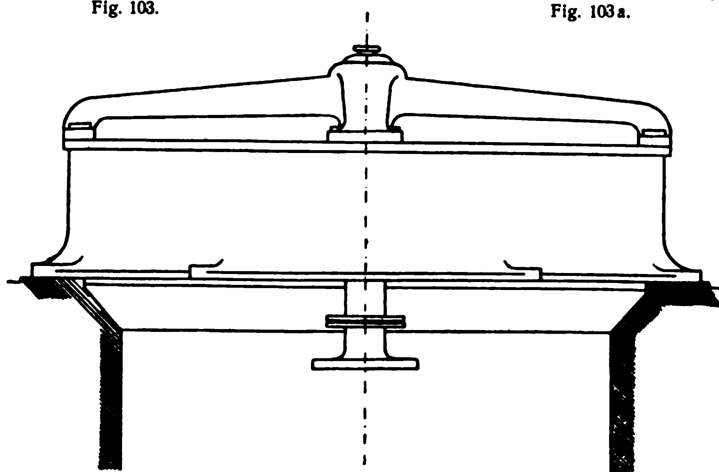


Fig. 104.

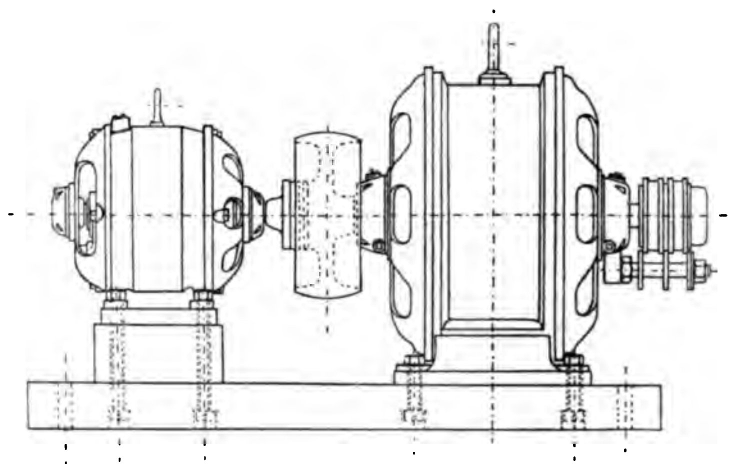


Fig. 105.

Die Figuren 106—110 zeigen ferner eine Anzahl Abbildungen der von den Deutschen Elektrizitätswerken zu Aachen, Garbe, Lahmeyer & Co. gebauten Maschinen. Das Magnetrad besteht aus einem Schwungrad, welches auf die Achse der Antriebsmaschine aufgekeilt wird. Es ist zweiteilig, geteilt längs zweier Arme und wird an der Achse und am Umfang durch Schrauben und Schrumpfringe zusammengehalten. Die Magnetwickelung besteht aus isoliertem Façonkupferdraht. Die Enden der Magnetwickelung werden längs eines Radarmes zur Nabe heruntergeführt und gehen von hier zu 2 Bronceringen, welche isoliert auf der



Fig. 106.

Achse befestigt sind. Die Stromzuführung zu den Schleifringen erfolgt durch mehrere Kohlebürsten, deren Bürstenzapfen von einem gußeisernen Bock getragen werden, der meistens seitlich an das Außenlager angeschraubt wird. Die Kabel, welche zu den Bürsten führen, gehen im Innern des Bockes zur Maschinengrube hinab, wo das Erregerkabel mündet.

Das Gehäuse ist als Rippen- und Hohlguß hergestellt. Ober- und Unterteil desselben sind durch im Innern sitzende Schrauben zusammengehalten und durch Prisonstifte in ihrer gegenseitigen Lage gesichert. Die an den Unterteil direkt angegossenen Füße ruhen auf gußeisernen Fußplatten, die in den Fußboden eingelassen und mit dem Fundament verankert sind. Die Einstellung und Zentrierung des Gehäuses erfolgt

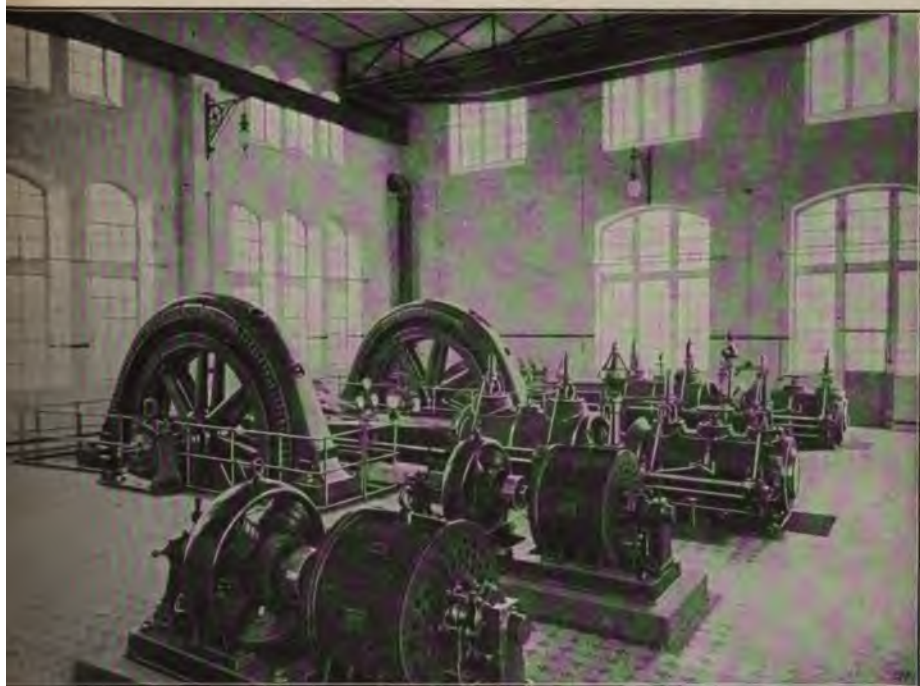


Fig. 107.



Fig. 108.

beiderseits durch 4 Stellschrauben, je 2 vertikale, die in stählernen Pfannen ruhen, und je 2 horizontale, die innen, von der Maschinengrube her, angebracht sind.

Fig. 109.

Die Enden der Ankerwickelung führen zu Klemmen, die mittels Rippenisolatoren am Gehäuse befestigt sind.

Die von den Deutschen Elektrizitätswerken zu Aachen gebauten Generatoren eignen sich besonders gut für Parallelbetrieb. Der Ungleich-

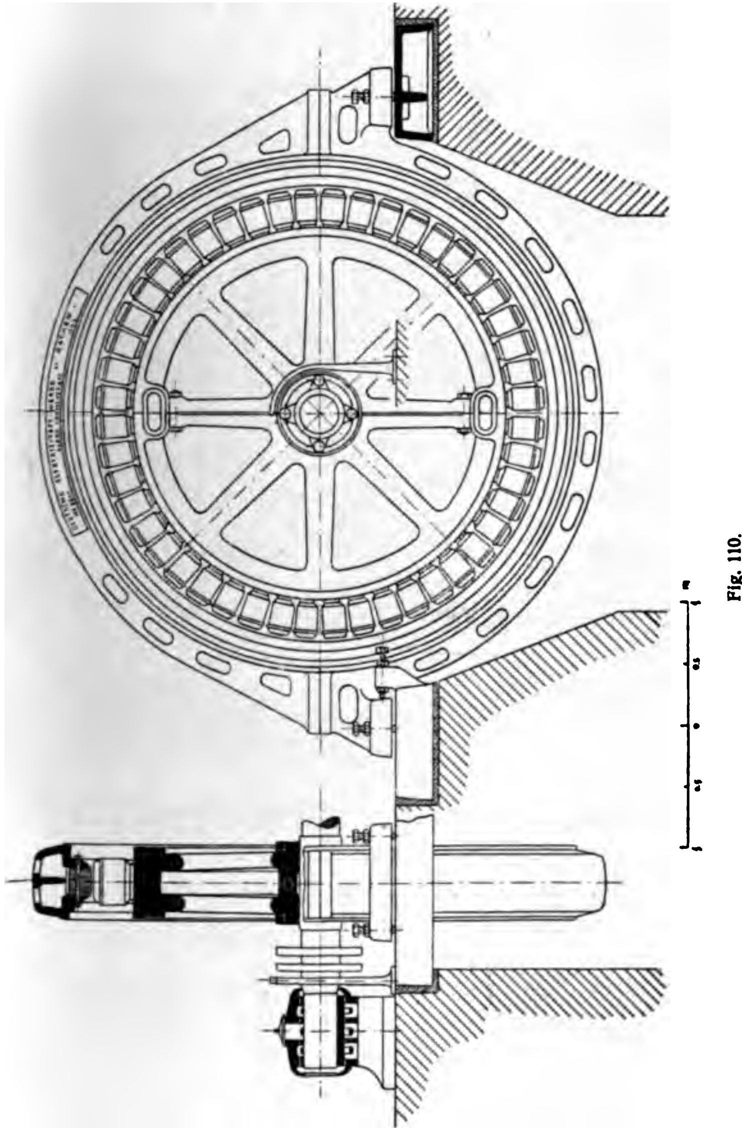
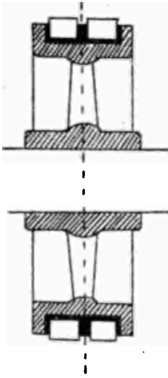


Fig. 110.

rmigkeitsgrad der Dampfmaschinen ist bei den in Fig. 108 abgebilten Maschinen 1 : 250.

Bei rotierendem Magnetsystem erfolgt die Stromzuführung für die gnetwickelung durch Schleifringe und Schleifbürsten, wobei die Zu-

leitungskabel oft durch die hohle Welle geführt werden. Bei rotierendem Anker sind für die Stromabnahme Schleifringe vorzusehen und zwar bei Einphasenmaschinen 2, bei Dreiphasenmaschinen 3, bei vorhandenem Nulleiter 4. Ausführungen von Schleifringen sind in den Figuren 111—113 angegeben.



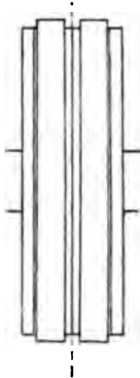


Fig. 111.

Fig. 112.

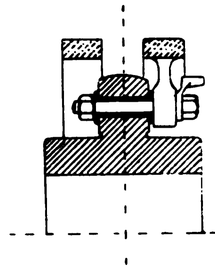


Fig. 113.

32. Berechnung der Welle. Die Festigkeitsberechnung des Magnetrades.

Der Durchmesser der Welle, die aus gutem Stahl herzustellen ist, wird meistens nach der Formel berechnet:

$$d = 120 \cdot \sqrt[3]{\frac{N}{n}} \text{ cm} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad (58)$$

Darin bezeichnet:

d den Wellendurchmesser in cm,
N den zu übertragenden Effekt in P. S.,
n die Tourenzahl pro Minute.

Rechnet man die Pferdestärken in elektrische Leistung um, so ergibt sich:

$$d = 120 \cdot \sqrt[3]{\frac{N}{n}} = 120 \cdot \sqrt[3]{\frac{P \cdot 1000}{736 \cdot n}} \text{ cm} \quad . \quad (59)$$

Hierin ist P die elektrische Leistung der Maschine in K · W. Somit wird:

$$d = 21 \cdot \sqrt[3]{\frac{P}{n}}\ \text{cm} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (60)$$

Der Wellendurchmesser läßt sich auch aus folgender Formel bestimmen:

$$d = 0{,}17 \cdot \sqrt[3]{D^2 \cdot l_1} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (61)$$

Hierin ist:

D der Durchmesser des rotierenden Systems in cm,

l_1 die Entfernung von Mitte Anker bis Mitte nächstes Lager in cm.

Am sichersten ist es jedoch, wenn man in jedem Falle die Welle auf zusammengesetzte Festigkeit (Biegung und Torsion) berechnet.

Die Zapfenlänge wird etwa 2 ÷ 4 mal dem Zapfendurchmesser gewählt. Mit Rücksicht auf die Lagerreibungsarbeit (Erwärmung) muß die Zapfenlänge der Bedingung entsprechen:

$$l = \frac{F \cdot n}{3000 \cdot A} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (62)$$

Darin ist:

l die Zapfenlänge in mm,

F der Lagerdruck in kg,

A die sekundliche Reibungsarbeit pro 1 qcm.

Für A ist etwa der Wert 0,5 einzuführen.

Die Berechnung der Radarme geschieht in folgender Weise:

Es sei: i die Anzahl der Arme,

R die Länge derselben vom Mittelpunkt der Achse aus gemessen in cm,

F die biegende Kraft in kg,

P die Leistung in Watt.

Nun gilt: $P = M_d \cdot \omega \cdot 9{,}81,$

wenn M_d das Drehmoment in mkg und ω die mechanische Winkelgeschwindigkeit ist.

$$\text{Also: } M_d = F \cdot \frac{R}{100}\ \text{mkg.}$$

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60}.$$

Man nimmt an, daß nur die Hälfte der Arme an der Kraftübertragung sich beteiligt, so daß sich die Kraft pro Speiche berechnet aus:

$$F = \frac{P}{\omega \cdot 9{,}81 \cdot \frac{R}{100} \cdot \frac{i}{2}} = \frac{P}{\frac{2\pi \cdot n}{60} \cdot 9{,}81 \cdot \frac{R}{100} \cdot \frac{i}{2}} =$$

$$200 \cdot \frac{P}{n \cdot R \cdot i} \quad \ldots \quad (63)$$

Für den maximal gefährdeten Querschnitt an der Nabe im Abstande h gilt dann:

$$F \cdot h = W \cdot k_b$$

Darin ist W das Widerstandsmoment der Speiche in cm^3 und k_b die zulässige Biegungsbeanspruchung in kg/qcm.

Die Schraubenbolzen, mit welchen die Pole auf den gußeisernen Jochring aufgeschraubt werden, sind auf Zug durch die bei der Rotation auftretende Zentrifugalkraft zu berechnen.

Ebenso wird der gußeiserne Jochring auf Zerreißen beansprucht und zwar durch die von seiner eigenen Masse und der Masse der Pole hervorgerufene Zentrifugalkraft. Will man sich ein Urteil über die Größe der hierdurch in demselben auftretenden Beanspruchung verschaffen, so rechnet man folgendermaßen:

Nach der Mechanik ist die Zentrifugalkraft gegeben durch die Beziehung:

$$Z = \frac{m \cdot v^2}{r} = m \cdot r \cdot \omega^2 \quad \ldots\ldots\ldots \quad (64)$$

Darin ist:

Z die Zentrifugalkraft,
m die Masse des betreffenden Körpers,
r der Rotationsradius des Schwerpunktes,
ω die mechanische Winkelgeschwindigkeit $= \frac{2\pi \cdot n}{60}$.

Nun ist:

$$m = \frac{G}{g} = \frac{\text{Gewicht des Körpers}}{\text{Beschleunigung}}.$$

Also:

$$Z = \frac{G}{g} \cdot r \cdot \left(\frac{2\pi \cdot n}{60}\right)^2 = \frac{G}{9{,}81} \cdot r \cdot \frac{4\pi^2 \cdot n^2}{60^2}$$
$$= 0{,}00112 \cdot G \cdot r \cdot n^2.$$

Das Gewicht eines Poles setzt sich aus dem Gewicht des Kerns und der Drahtspule zusammen und sei G_p. Der Schwerpunktradius eines Pols sei r_p und die Tourenzahl des Rades n pro Minute.

Die hierdurch hervorgerufene Zentrifugalkraft ist demnach:

$$0{,}00112 \cdot G_p \cdot r_p \cdot n^2 \cdot$$

Also bei 2p Polen:

$$Z_p = 2p \cdot G_p \cdot r_p \cdot n^2 \cdot 0{,}00112.$$

Diese Kraft verteilt sich auf den mittleren Umfang des Joches. Ist r_J der mittlere Radius des Joches, so erfährt 1 cm Umfang desselben durch die Pole eine Zentrifugalkraft:

$$Z_{p\ \text{pro 1 cm}} = \frac{2p \cdot G_p \cdot r_p \cdot n^2 \cdot 0{,}00112}{2 r_J \cdot \pi}.$$

Der Jochring ist nun durch die Arme kräftig versteift, so daß ein bedeutender Teil der gesamten Zentrifugalkraft von den Armen aufgenommen wird. Genau läßt sich aber die Verteilung der Belastung hier nicht feststellen. Der Einfachheit halber wollen wir daher annehmen, daß die gesamte Spannung von dem Joch aufgenommen werden muß, durch welche Annahme natürlich nur die Sicherheit der Rechnung entsprechend vergrößert wird.

Ist nun G_J das Gewicht des Joches, so ist die durch dasselbe verursachte Zentrifugalkraft pro Zentimeter Umfang:

$$Z_J \text{ pro } 1 \text{ cm} = \frac{G_J \cdot r_J \cdot n^2 \cdot 0{,}00112}{2 r_J \cdot \pi} = \frac{G_J \cdot n^2 \cdot 0{,}00112}{2\pi} \cdot$$

Die gesamte Zentrifugalkraft pro 1 cm Umfang ist dann:

$$Z' = Z_p \cdot \text{pro } 1 \text{ cm} + Z_J \text{ pro } 1 \text{ cm.}$$

Auf 2 diametral gegenüberliegende Querschnitte, z. B. auf die beiden in dem horizontalen Durchmesser liegenden Querschnitte, wirkt dann eine Zerreißkraft von der Größe:

$$Z = 2 r_J \cdot Z' \cdot$$

Ist der Querschnitt des Joches Q_J, so erhalten wir also die Beanspruchung pro qcm:

$$k_z = \frac{Z}{2 \cdot Q_J} \cdot$$

Kap. VI.

Berechnung von ein- und mehrphasigen Wechselstromgeneratoren.

33. Zweckmäßiger Gang der Berechnung.

Bei der Berechnung der Dimensionen einer Wechselstrommaschine kommt es in erster Linie darauf an, den Durchmesser des Ankers zu bestimmen. Für diesen gibt Parshal in Abhängigkeit von der Leistung folgende Beziehung an:

$$D_a = 75 + \frac{P}{2} + \frac{2500}{e} \text{ cm} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (65)$$

Darin ist P die Leistung in K. W. und e die Klemmspannung.

Berechnet man jedoch den Ankerdurchmesser ausgeführter moderner Maschinen nach dieser Formel, so ergeben sich zum Teil beträchtliche Abweichungen. Das Resultat der obigen Formel wird meistens nur als ein Näherungswert zu betrachten sein.

Andererseits läßt sich der Durchmesser des rotierenden Systems berechnen, wenn man die Umfangsgeschwindigkeit und die Tourenzahl der Maschine annimmt. Die Umfangsgeschwindigkeit ist:

$$v = \frac{D \cdot \pi \cdot n}{100 \cdot 60} \text{ m/sek} \cdot (\text{D in cm!})$$

$$\text{Daraus: } D = \frac{v \cdot 100 \cdot 60}{\pi \cdot n} \text{ cm} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (66)$$

Die Umfangsgeschwindigkeit des Magnetsystems kann dabei 20—30 m gewählt werden, wenn die Magnetwickelung aus rundem Kupferdraht, der mit Baumwolle besponnen ist, hergestellt wird. Verwendet man hochkantig gewickeltes Kupferband, das durch Zwischenlagen von Papier oder Glimmer isoliert wird, so kann v bis 40 m gewählt werden. Anhalte für die Wahl der Tourenzahl bei gegebener Leistung gibt die folgende Tabelle:

Leistung in K· W.	Tourenzahl pro Minute
2	1500
5	1100
10	900
20	750
30	650
40	575
50	500
60	450
70	420
80 ÷ 150	400 ÷ 300
150 ÷ 200	300 ÷ 250

Auch die in dieser Tabelle angegebenen Werte besitzen keine absolute Gültigkeit, vielmehr ist es sehr oft geboten, eine Maschine mit bestimmter Leistung mit wesentlich von der Tabelle abweichender Tourenzahl zu konstruieren.

Die Tourenzahl ist nun aber im Verein mit der Pohlzahl so zu wählen, daß die Maschine die vorgeschriebene Periodenzahl erhält:

$$\nu = p \cdot \frac{n}{60}.$$

Als Periodenzahl wird gewöhnlich die Zahl 50—60 gewählt, am häufigsten findet man 50 Perioden ausgeführt. Der Grund für die Wahl dieser Zahl liegt in den ungleichen Verhältnissen bei Kraft und Lichtbetrieb. Für Glühlampen ist eine hohe Periodenzahl insofern geboten, als durch eine solche die durch die Stromschwankungen bedingten Schwankungen der Helligkeit (Zucken) entsprechend beseitigt werden. Für Motorbetrieb ist andererseits eine hohe Periodenzahl gleichbedeutend mit hohen Verlusten und schlechtem Wirkungsgrad, da die Hysteresisverluste der Periodenzahl direkt, die Wirbelstromverluste sogar im Quadrate proportional sind, siehe Gleichung 44 und 45. Bei gemischtem Betrieb, der ja am häufigsten vorkommt, ergibt sich daher die Periodenzahl aus einem Kompromiß zwischen der für alleinigen Lichtbetrieb und alleinigen Kraftbetrieb günstigsten zu etwa 50 pro Sekunde. Für reinen Kraftbetrieb wäre dagegen eine Periodenzahl von 35 pro Sekunde die vorteilhafteste.

Hierauf ist die Ampèrewindungszahl pro 1 cm Ankerumfang, d. i. das Produkt aus den Windungen auf 1 cm des Ankerumfangs und der effektiven Stromstärke zu wählen. Auch für diese Zahl findet man bei ausgeführten Maschinen stark abweichende Werte, insbesondere läßt sich keine bestimmte Abhängigkeit dieser Zahl von der Leistung feststellen. Für mittlere Maschinen kann man pro 1 cm Ankerumfang etwa 40 ÷ 60 Ampèrewindungen annehmen. Bezeichnen wir die Zahl mit K, so ist:

$$K = \frac{\chi_a}{(D_a + \delta)\,\pi} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (67)$$

Dabei ist δ der Luftabstand in cm, χ_a die Ampèrewindungszahl des Ankers.

χ_a berechnet sich hierbei im einzelnen, wie folgt, wenn ξ'_a die

Windungszahl des Ankers pro Phase und i′ den Ankerstrom pro Phase bezeichnet:

Für Einphasenmaschinen ist:

$$\chi_a = \xi'_a \cdot i' \quad \ldots \quad (68)$$

Für Zweiphasenmaschinen ist:

$$\chi_a = \sqrt{2} \cdot \xi'_a \cdot i' \quad \ldots \quad (69)$$

Für Dreiphasenmaschinen ist die Ampèrewindungszahl im Verhältnis $\frac{3}{2}$ mal so groß wie bei Zweiphasenmaschinen, also:

$$\chi_a = \frac{3}{2} \sqrt{2} \cdot \xi'_a \cdot i' = 1{,}5 \cdot \sqrt{2} \cdot \xi'_a \cdot i' \quad \ldots \quad (70)$$

Bezeichnet E′ die elektromotorische Kraft pro Phase, z′ die Zahl der hintereinander geschalteten Leiter pro Phase, so ist:

$$E' = 2{,}22 \cdot N \cdot \nu \cdot z' \cdot 10^{-8} = 4{,}44 \cdot N \cdot \nu \cdot \xi'_a \cdot 10^{-8} \quad \ldots \quad (71)$$

Für Drehstrom in Sternschaltung ist die verkettete Spannung:

$$E = \sqrt{3} \cdot E' \quad \ldots \quad (72)$$

Für die übrigen Schaltungen ist E = E′.

Bedeutet B_z die Induktion in den Zähnen, Q_z den Querschnitt der Zähne, so gilt:

$$Q_z = \frac{N}{B_z} \quad \ldots \quad (73)$$

Durch Annahme von B_z folgt Q_z. Aus Q_z läßt sich die Ankerlänge b bestimmen.

Wählt man nunmehr die Induktion im Ankereisen B_a, so läßt sich aus der Gleichung:

$$Q_a = \frac{N}{B_a} \quad \ldots \quad (74)$$

der Ankerquerschnitt berechnen. Da die Ankerlänge bereits bekannt, so ist hiermit die radiale Eisentiefe des Ankers festgelegt.

Bezeichnen wir mit τ die Polteilung, d. h. die Entfernung von Mitte Norpol bis Mitte Südpol, so gilt:

$$\tau = \frac{D \cdot \pi}{2p}.$$

Das Verhältnis : Polteilung zu Polbreite soll nach früherem zwischen 0,6 ÷ 0,8 gewählt werden, also wird der Polbogen:

$$\beta = (0{,}6 \div 0{,}8)\, \tau \quad \ldots \quad (75)$$

34. Berechnung eines Einphasengenerators für 150 KW.

Aufgabe: Es sei ein Einphasengenerator zu konstruieren für eine Klemmspannung von 3000 Volt und 50 Amp. Stromstärke. Die Periodenzahl sei 3200 pro Stunde, der Leistungsfaktor cos φ = 0,8.

Lösung: a) Berechnung des Ankers.

Es handelt sich zunächst darum, den Spannungsabfall zwischen Leerlauf und Vollbelastung anzunehmen. Derselbe ist, wie das Kappsche Diagramm zeigt, bei induktiver Belastung besonders groß. Derselbe beträgt bei gut ausgeführten Maschinen bis zu 15% und mehr der Leerlaufspannung. Nehmen wir für unsere Maschine etwa 20% Spannungsabfall an, so ergibt sich die Leerlaufsspannung, also die elektromotorische Kraft unserer Maschine zu:

$$E = 1{,}2 \cdot e = 1{,}2 \cdot 3000 = 3600 \text{ Volt.}$$

Wir wählen ferner eine Tourenzahl $n = 400$ und eine Umfangsgeschwindigkeit $v = 28$ m/sek.

Dann ergibt sich der Durchmesser des rotierenden Magnetsystems aus der Formel:

$$v = \frac{D \cdot \pi \cdot n}{60 \cdot 100}.$$

$$D = \frac{v \cdot 60 \cdot 100}{\pi \cdot n} = \frac{28 \cdot 60 \cdot 100}{\pi \cdot 400} = 133 \text{ cm.}$$

Der Luftraum δ werde vorläufig gleich 1 cm gesetzt. Damit wird der Ankerdurchmesser:

$$D_a = D + 2\,\delta = 133 + 2 \cdot 1 = 135 \text{ cm.}$$

Nehmen wir jetzt die Ampèrewindungszahl pro 1 cm zu $K = 50$ an, so ergibt sich die Gesamtampèrewindungszahl des Ankers:

$$\chi_a = K \cdot (D + 2\,\delta)\,\pi = 50 \cdot 135 \cdot \pi = 21500.$$

Bei einem Ankerstrom $i = 50$ Amp. liefert dies:

$$\xi_a = \frac{\chi_a}{i} = \frac{21500}{50} = 430 \text{ Windungen.}$$

Das gibt eine gesamte Drahtzahl:

$$z' = 2 \cdot \xi_a = 2 \cdot 430 = 860.$$

Die Anzahl der Pole folgt nunmehr aus der Formel:

$$\nu = \frac{p \cdot n}{60}.$$

$$p = \frac{\nu \cdot 60}{n} = \frac{53{,}3 \cdot 60}{400} = 8.$$

Also erhält die Maschine $2 \cdot 8 = 16$ Pole.

Es kommt nun zunächst darauf an, die Nuten zur Aufnahme der Drahtzahl z' zu bestimmen. Wählen wir pro Pol 2 Nuten, so erhält der Anker im ganzen $16 \cdot 2 = 32$ Nuten, in welchen insgesamt 860 Drähte unterzubringen sind. Also erhalten wir pro Nut:

$$\frac{860}{32} = 27 \text{ Drähte}$$

Nun ist die Polteilung bei unserer Maschine:

$$\tau = \frac{D \cdot \pi}{2p} = \frac{135 \cdot \pi}{16} = 26{,}5 \text{ cm.}$$

Wählen wir die Polbreite gleich $\frac{2}{3}$ der Teilung, so wird:

$$\beta = \frac{2}{3} \cdot \tau = \frac{2}{3} \cdot 26,5 = 17,7 \text{ cm.}$$

Die Stromdichte im Anker werde zu 3 Amp./qmm angenommen. Damit wird der Querschnitt des Ankerdrahtes:

$$p = \frac{50}{3} = 16,7 \text{ qmm.}$$

Dazu gehört ein Drahtdurchmesser (unisoliert) von 4,6 mm. Rechnet man für Isolation 20%, so wird:

$$d \text{ (isoliert)} = 1,2 \cdot 4,6 = 5,5 \text{ mm.}$$

Am zweckmäßigsten ist eine halboffene Nut, die durch einen Holzkeil geschlossen wird. Die in die Nut einzulegenden 27 Drähte würden sich in 3 × 9 zerlegen lassen, was aber mit Rücksicht auf die früheren Mitteilungen über die Nutendimensionen sich nicht ausführen ließe. Man lege vielmehr 5 Drähte neben- und 5 Drähte übereinander. Die restierenden 2 Drähte können dann unten eingelegt werden, wobei der Holzkeil mit einer passenden Vertiefung zur Aufnahme derselben versehen wird.

Rechnet man je 1 mm Isolation an den Wänden der Nut, so ergibt sich eine Nutenbreite:

$$\text{Nutenbreite} = 5 \cdot 5,5 + 2 \cdot 1 = 29,5 \text{ mm.}$$

Macht man den Schlußkeil 8,5 mm stark, so folgt die Nutentiefe:

$$\text{Nutentiefe} = 5 \cdot 5,5 + 1 + 8.5 = 37 \text{ mm.}$$

Hiermit kann die Nut aufgezeichnet werden, wie Fig. 114 und 115 zeigt.

Die zur Erzeugung der elektromotorischen Kraft E = 3600 erforderliche, durch den Anker schneidende Kraftlinienzahl ergibt sich aus der Gleichung:

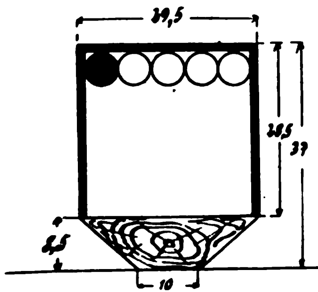


Fig. 114.

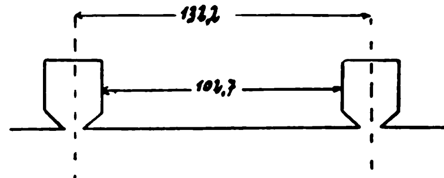


Fig. 115.

$$E = 2,22 \cdot N \cdot \nu \cdot z' \cdot 10^{-8}.$$

$$N = \frac{E \cdot 10^8}{2,22 \cdot \nu \cdot z'} = \frac{3600 \cdot 10^8}{2,22 \cdot 53,3 \cdot 860} = 3,58 \cdot 10^6 .$$

Wir wählen nun die Induktion in den Zähnen: $B_z = 9000$. Dies bedingt einen Zahnquerschnitt:

$$Q_z = \frac{N}{B_z} = \frac{3,58 \cdot 10^6}{9000} = 398 \text{ qcm.}$$

Die Zahnbreite beträgt:

$$\frac{D_a \cdot \pi - 32 \cdot 2{,}95}{32} = \frac{135 \cdot \pi - 32 \cdot 2{,}95}{32} = 10{,}27 \text{ cm.}$$

Damit wird die Ankerbreite unter Berücksichtigung der Papierisolation mit 10%:

$$b = \frac{398}{10{,}27 \cdot 0{,}9} = 43 \text{ cm.}$$

Nehmen wir nun die Ankerinduktion $B_a = 6000$ an, so ergibt sich der Ankerquerschnitt mit Berücksichtigung der Tatsache, daß sich die Kraftlinien im Anker nach beiden Seiten teilen, also nur der halbe Querschnitt erforderlich wird, zu:

$$Q_a = \frac{3{,}58 \cdot 10^6}{2 \cdot 6000} = 298 \text{ qcm.}$$

Der Ankerquerschnitt setzt sich aus der Ankerbreite und der Ankerhöhe zusammen. Demnach wird die Eisentiefe des Ankers (10% Papierisolation berücksichtigt):

$$h = \frac{298}{43 \cdot 0{,}9} = \sim 8 \text{ cm.}$$

Der äußere Durchmesser des Ankers wird somit:

$$135 + 2 \cdot 3{,}7 + 2 \cdot 8 = 158{,}4 \text{ cm.}$$

Die mittlere Länge einer Windung beträgt nun:

$$2 \cdot 13{,}22 + 2 \cdot 43 + 2 \cdot 2{,}75 = 117{,}94 \text{ cm} = \sim 1{,}18 \text{ m.}$$

Also die gesamte Drahtlänge bei 430 Windungen:

$$l = 430 \cdot 1{,}18 = \sim 506 \text{ m.}$$

Bei dieser Drahtlänge ergibt sich ein Ankerwiderstand (warm):

$$w_a = c \cdot \frac{l}{q} = 0{,}02 \cdot \frac{506}{16{,}7} = 0{,}6 \text{ Ohm.}$$

Der Joulesche Ankerverlust beträgt dann:

$$i^2 \cdot w_a = 50^2 \cdot 0{,}6 = 1500 \text{ Watt.}$$

Wir gehen nun zur Berechnung der Hysteresisverluste über. Dieselben setzen sich aus den Verlusten in den Zähnen und im Anker zusammen.

Das Volumen der Zähne an Eisen beträgt:

$$V_z = 0{,}9 \cdot 43 \cdot \left[138{,}7^2 \frac{\pi}{4} - 135^2 \frac{\pi}{4} - 32 \cdot 3{,}7 \cdot 2{,}95 \right] =$$

$$0{,}9 \cdot 43 \cdot \left[15100 - 14300 - 350 \right] = 19000 \text{ ccm.}$$

Demnach ist das Gewicht der Zähne:

$$G_z = 7{,}7 \cdot 19 = 146 \text{ kg.}$$

Nach der Kappschen Tabelle über Hysteresisverluste beträgt die Verlustziffer bei $B_z = 9000$ etwa 6,5 Watt pro kg. Der von Niethammer ermittelte Wert ist etwa 17 Watt. Im Mittel ergibt sich aus diesen Angaben eine Verlustziffer von 12 Watt/kg.

Dann ergibt sich der Hysteresisverlust in den Zähnen bei 146 kg und 53,3 Perioden zu:

$$P_{h_1} = \frac{12 \cdot 146 \cdot 53{,}3}{100} = 930 \text{ Watt.}$$

Das Volumen des Ankerkerns ist:

$$V_a = (158{,}4^2 - 138{,}7^2)\frac{\pi}{4} \cdot 0{,}9 \cdot 43 = 180000 \text{ ccm.}$$

Demnach das Gewicht:

$$G_a = 7{,}7 \cdot 180 = 1386 \text{ kg.}$$

Bei einer Induktion von 6000 beträgt der Hysteresisverlust pro kg und 100 Perioden im Mittel aus den beiden Tabellen etwa 6.

Damit folgt für den Hysteresisverlust im Anker:

$$P_{h_2} = \frac{1386 \cdot 6 \cdot 53{,}3}{100} = 4440 \text{ Watt.}$$

Also der gesamte Hysteresisverlust:

$$P_h = P_{h_1} + P_{h_2} = 930 + 4440 = \underline{5370} \text{ Watt.}$$

Zweckmäßig kontrolliert man jetzt an Hand der hierfür gültigen Formel die Temperaturerhöhung des Ankers.

Nach Gleichung 52a gilt für den feststehenden Anker:

$$T = 300 \cdot \frac{P_v}{O} \cdot$$

Dabei ist: $P_v = 1500 + 5370 = 6870$ Watt.

Die Oberfläche setzt sich zusammen aus der äußeren, der inneren und den beiden Stirnflächen.

$$O = 135 \cdot \pi \cdot 43 + 158{,}4 \cdot \pi \cdot 43 + \left(158{,}4^2 - 135^2\right)\frac{\pi}{2} = 50400 \text{ qcm.}$$

Also:

$$T = 300 \cdot \frac{6870}{50400} = 41^0 \text{ C.}$$

Damit dieser Wert von 41° C, der zulässig ist, nicht überschritten wird, ist das Gehäuse mit einer genügenden Zahl von Öffnungen zu versehen. Im anderen Falle wäre es nicht statthaft, die ganze äußere Oberfläche als abkühlend einzusetzen.

b) Dimensionierung der Magnete.

Der mittlere Querschnitt für die Kraftlinien in der Luft berechnet sich, wie folgt:

$$Q_{l_{mittel}} = \frac{13{,}22 + 10{,}27}{2} \cdot 43 = 504 \text{ qcm.}$$

Dadurch erhalten wir eine Luftinduktion:

$$B_l = \frac{3{,}58 \cdot 10^6}{504} = 7100.$$

Bei einem Luftabstand $\delta = 1$ cm bedingt diese Induktion eine magnetomotorische Kraft:

$$F_l = B_l \cdot l_l = B_l \cdot 2 \cdot \delta = 7100 \cdot 2 \cdot 1 = 14200.$$

Nun ist:

$$F_l = 0{,}4\,\pi \cdot \xi \cdot i_m \cdot$$

Die Ampérewindungszahl pro magnetischen Kreis wird also:

$$\chi_l = \xi \cdot i_m = \frac{F_l}{0{,}4\,\pi} = \frac{14\,200}{0{,}4\,\pi} = 11\,350.$$

Diese Ampèrewindungszahl 11 350 würde erforderlich sein, um den Kraftfluß durch die Luft zu treiben. Schätzen wir vorläufig den Betrag für den Eisenweg, der immer relativ klein ist, zu 10%, so betrüge die gesamte, auf einem Polpaar unterzubringende Ampèrewindungszahl:

$$\chi_m = 1{,}1 \cdot \chi_l = 1{,}1 \cdot 11\,350 = 12\,500.$$

Man kann die Zuverlässigkeit dieses Wertes mit Hülfe der Regel beurteilen, daß bei normalen Maschinen der Quotient aus den Ampèrewindungen pro magnetischen Kreis und den Ampèrewindungen des Ankers pro magnetischen Kreis 2 bis höchstens 4 sein soll.

Die Ampèrewindungszahl des Ankers ist $\chi_a = 21\,500$, also pro magnetischen Kreis $\frac{21\,500}{8} = 2690$.

Demnach: $\frac{12\,500}{2690} = 4{,}64$.

Der Betrag der Feldampèrewindungen ist also zu groß. Um ihn zu verkleinern, werden wir den Luftraum δ abändern müssen. Es werde gewählt: $\delta = 0{,}7$ cm.

Dann wird:

$$F_l = 7100 \cdot 1{,}4 = 9950.$$

$$\chi_l = \frac{9950}{0{,}4\,\pi} = 7\,950\cdot$$

Und:

$$\chi_m = 1{,}1 \cdot \chi_l = 1{,}1 \cdot 7\,950 = 8\,750.$$

Nehmen wir die Stärke des Magnetstromes zu 7,7 Amp. an, so wird die Windungszahl:

$$\xi = \frac{8750}{7{,}7} = 1140.$$

Auf einen Polschenkel entfallen demnach $\frac{1140}{2} = 570$ Windungen.

Wir wählen eine Stromdichte vom 1,5 Amp./qmm in der Magnetwickelung. Dann ergibt sich der Drahtquerschnitt:

$$q = \frac{7{,}7}{1{,}5} = 5{,}14 \text{ qmm}.$$

Dazu gehört ein Drahtdurchmesser:

$$d = 2{,}6 \text{ mm}.$$

Isoliert:

$$d' = 1{,}2 \cdot 2{,}6 = 3{,}12 \text{ mm}.$$

Auf einen Schenkel kommen also 570 Windungen à 3,12 mm Durchmesser.

Wir legen: 32 Drähte nebeneinander}
18 „ übereinander }

Dann wird die Höhe der Wickelung:

$$h = 32 \cdot 3{,}12 = 100 \text{ mm}.$$

Die Breite:

$$a = 18 \cdot 3{,}12 = 56 \text{ mm}.$$

Rechnen wir für die Flanschenstärke 5 mm, so wird die Spulenhöhe:

$$100 + 2 \cdot 5 = 110 \text{ mm}.$$

Mit der Änderung des Luftabstandes δ muß nun auch der Durchmesser des Magnetrades geändert werden. Derselbe beträgt nunmehr $133 + 2 \cdot 0{,}3 = 133{,}6$ cm.

Um nun die Eisendimensionen der Pole zu berechnen, schätzen wir vorläufig den Streuungsfaktor σ. Derselbe sei 1,2.

Dann ist der Kraftlinienflux in den Polen:

$$N_P = 1{,}2 \cdot N = 1{,}2 \cdot 3{,}58 \cdot 10^6 = 4{,}3 \cdot 10^6.$$

Nehmen wir in den aus Gußstahl hergestellten Magneten eine Induktion $B_P = 16000$ an, so wird der Polquerschnitt:

$$Q_P = \frac{43 \cdot 10^6}{16000} = 270 \text{ qcm}.$$

Die Breite des Polkerns wird dann bei einer gewählten Länge von 27 cm:

$$\frac{270}{27} = 10 \text{ cm}.$$

Die Pole werden auf einen gußeisernen Jochring aufgeschraubt, in welchem die Induktion $B_J = 6000$ betragen soll. Da sich die Kraftlinien in demselben nach beiden Seiten teilen, so ist nur der halbe Querschnitt erforderlich, also:

$$Q_J = \frac{4{,}3 \cdot 10^6}{2 \cdot 6000} = 360 \text{ qcm}.$$

Machen wir den Ring 36 cm breit, so wird seine radiale Dimension 10 cm.

Mit diesen Angaben läßt sich die Maschine aufzeichnen. In Fig. 116 ist dies für einen Radius Unendlich geschehen.

c) Genaue Berechnung des Streuungsfaktors.

Wir haben vorhin den Streuungsfaktor σ willkürlich zu 1,2 geschätzt, ein Wert, der verhältnismäßig hoch ist. Es ist jetzt unsere Aufgabe, denselben genauer zu berechnen. Dazu dienen die im Kap. II, 16 entwickelten Formeln.

Wir berechnen zunächst die Streulinien N_1, welche direkt zwischen den inneren Polflächen übergehen. Nach Formel 24 gilt:

$$N_1 = 0{,}4 \pi \xi \cdot i \cdot \frac{b \cdot h}{a}.$$

Dabei ist: b = 27 cm
h = 11 cm
a = 16,5 cm
$\xi \cdot i$ = 8750 cm.

Also:

$$N_1 = 0{,}4\,\pi \cdot 8750 \cdot \frac{27 \cdot 11}{16{,}5} = 180000.$$

Die von den beiden Vorderflächen übergehenden Streulinien berechnen sich aus Gleichung 25:

$$N_2 = 2 \cdot 0{,}92 \cdot \xi \cdot i \cdot h \cdot \log\left(\frac{a + \pi c}{a}\right).$$

Dabei ist: c = 10 cm.

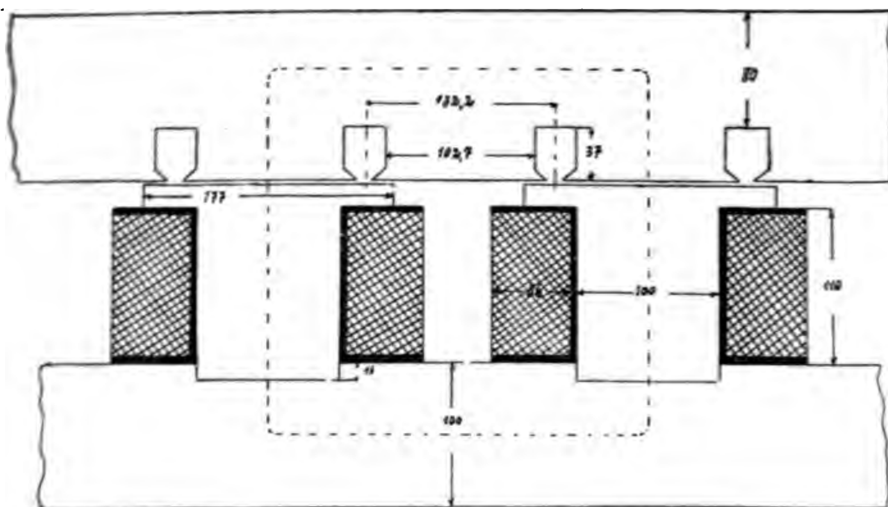


Fig. 116.

Demnach:

$$N_2 = 2 \cdot 0{,}92 \cdot 8750 \cdot 11 \cdot \log\left(\frac{16{,}5 + \pi \cdot 10}{16{,}5}\right) = 82000.$$

Endlich N_3 nach der Formel 26:

$$N_3 = 0{,}92 \cdot \xi \cdot i \cdot b \cdot \log\left(\frac{a + \pi \cdot c}{a}\right).$$

$$N_3 = 0{,}92 \cdot 8750 \cdot 27 \cdot \log\left(\frac{16{,}5 + \pi \cdot 10}{16{,}5}\right) = 122500.$$

Dann wird der gesamte Streufluß:

$$N_S = N_1 + N_2 + N_3 = 180000 + 82000 + 122500 = \underline{384500.}$$

In Wirklichkeit wird der Streufluß noch größer werden, da sich die Kraftlinien nicht innerhalb des durch die Formel vorgeschriebenen Querschnittes bewegen, vielmehr sich noch darüber hinausbewegen. Um

diesen Verhältnissen Rücksicht zu tragen, erhöhen wir den oben berechneten Streufluß noch um 20%. Alsdann wird derselbe:

$$N_s = 1{,}2 \cdot 384500 = 462000.$$

Es ergibt sich also, daß wir für jeden magnetischen Kreis eine gesamte Kraftlinenzahl von $3{,}58 \cdot 10^6 + 0{,}462 \cdot 10^6 = 4{,}042 \cdot 10^6$ nötig haben.

Damit ergibt sich dann der genaue Streuungsfaktor:

$$\sigma = \frac{4{,}042 \cdot 10^6}{3{,}58 \cdot 10^6} = 1{,}13.$$

Von den in den Magneten erzeugten Kraftlinien gehen also 13% für den Anker verloren.

d) Genaue Berechnung der Ampèrewindungen.

Es sollen nunmehr die vorher zum Teil nur geschätzten Ampèrewindungen genau berechnet werden.

Die Kraftlinienwege in den einzelnen Teilen des magnetischen Kreises sind:

Luft: $l_l = 2 \cdot 0{,}7 = 1{,}4$ cm.

Pole: $l_p = 2 \cdot (11 + 1{,}5) = 25$ cm.

Die Polschuhe können vernachlässigt werden.

Joch: $l_J = 26{,}5 + 2 \cdot 3{,}5 = 33{,}5$ cm

Der Anker kann bei der gewählten niedrigen Induktion ebenfalls vernachlässigt werden.

Zähne: $l_z = 2 \cdot 3{,}7 = 7{,}4$ cm.

Die Induktion in den Polen wird nun:

$$B_p = \frac{4{,}042 \cdot 10^6}{270} = 14950$$

Im Joch wird die Induktion:

$$B_J = \frac{4{,}042 \cdot 10^6}{2 \cdot 360} = 5600.$$

Die Zahninduktion bleibt 9000.

Aus den Magnetisierungskurven (Fig. 117) ergibt sich nun zu:

$B_p = 14950$ . . . . $H_p = 19$ (Kurve für Stahlguß).
$B_J = 5600$ . . . . $H_J = 16$ (Kurve für Gußeisen).
$B_l = H_l = 7100.$
$B_z = 9000$ . . . . $H_z = 5$ (Kurve für Schmiedeeisen).

Die magnetomotorische Kraft des ganzen Kreises wird demnach:

$$F = 7200 \cdot 1{,}4 + 19 \cdot 25 + 16 \cdot 33{,}5 + 5 \cdot 7{,}4 = 10080 + 475 + 536 + 37 = 11128 = \sim 11130.$$

Die auf den Polen aufzubringenden Ampèrewindungen sind also:

$$\chi_m = \frac{11130}{0{,}4\,\pi} = 9000.$$

Wir haben verlegt pro Pol $32 \cdot 18 = 576$ Windungen, also pro Polpaar 1152, Die Stromstärke in der Magnetwickelung wird demnach genau $= \frac{9000}{1152} = 7,8$ Amp. gegen den früheren Wert von 7,7 Amp. Das ändert natürlich an dem Drahtquerschnitt nichts, da damit die Stromdichte nur um einen ganz kleinen Betrag zunimmt.

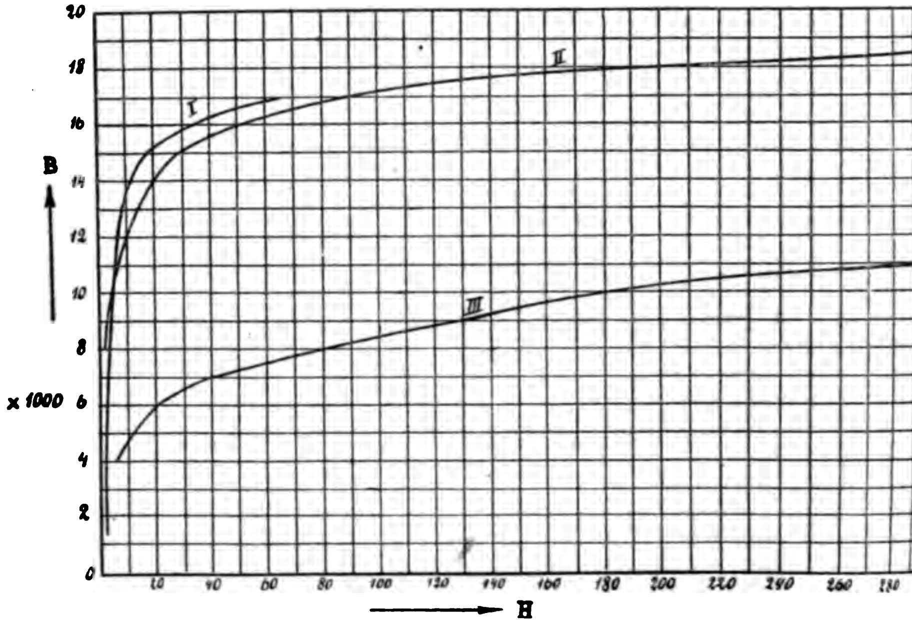


Fig. 117.

e) Konstruktion der Charakteristik.

Um die Charakteristik zu konstruieren, nimmt man verschiedene Kraftlinienzahlen an und berechnet die in folgender Tabelle angegebenen Werte:

N	$B_l = \frac{N}{Q_l}$	$B_p = \frac{1,13 \cdot N}{Q_p}$	$B_J = \frac{1,13 \cdot N}{2 \cdot Q_J}$	H_p	H_J	$0,8 H_l \cdot l_l$	$0,8 H_p \cdot l_p$	$0,8 H_J \cdot l_J$	$X_m = \Sigma 0,8\, H \cdot l$	$i_m = \frac{X_m}{\xi_m}$
$1 \cdot 10^6$	1985	4180	1570	3	—	2220	60	—	2280	1,8
$2 \cdot 10^6$	3970	8360	3140	4		4440	80	—	4520	3,92
$3 \cdot 10^6$	5955	12540	4710	7	8	6660	140	214	7014	6,1
$3,58 \cdot 10^6$	7100	14950	5600	19	16	7950	475	536	8961	7,8

Der Betrag für die Zähne, der ja bei der höchsten Induktion nur 37 beträgt, ist vernachlässigt.

Mit diesen Werten ist in Fig. 118 die statische Charakteristik der Maschine aufgezeichnet. Da bei $3,58 \cdot 10^6$ Kraftlinien die Maschine

eine Leerlaufsspannung von 3600 Volt gibt, so ergibt sich auf der rechten Ordinate der Figur der Voltmaßstab für die bei den einzelnen Kraftlinienzahlen auftretenden Spannungen aus der Beziehung:

$$E = 2{,}22 \cdot N \cdot \nu \cdot z' \cdot 10^{-8} \cdot$$

$$E = 2{,}22 \cdot N \cdot 53{,}3 \cdot 860 \cdot 10^{-8} = \underline{1016 \cdot N \cdot 10^{-6}}$$

So gibt die Maschine bei:

$N = 3{,}58 \cdot 10^{-6}$ eine Leerlaufsspannung $E = 3600$ Volt.
$N = 3 \cdot 10^{-6}$ „ „ $E = 3048$ „
$N = 2 \cdot 10^{-6}$ „ „ $E = 2032$ „
$N = 1 \cdot 10^{-6}$ „ „ $E = 1016$ „

Um nun auch die Verhältnisse der Maschine bei Betrieb übersehen zu können, konstruieren wir nach den in Kapitel II, 15 gemachten An-

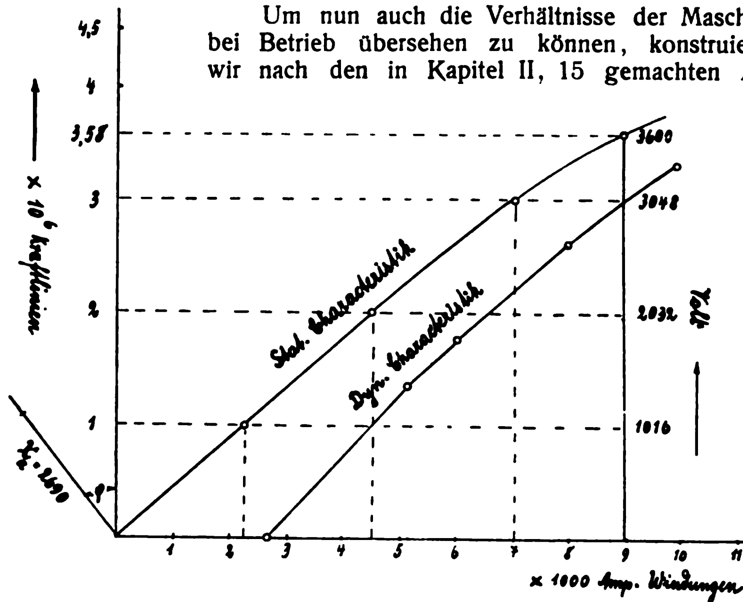


Fig. 118.

gaben die dynamische Charakteristik für cos $\varphi = 0{,}8$ und 2690 Ampèrewindungen Ankerrückwirkung. Aus der Zeichnung ergibt sich, daß wir bei den berechneten Feldampèrewindungen genau die verlangte Klemmspannung von 3000 Volt bei Betrieb erhalten. Die Charakteristiken sind fast genau gerade Linien, da die Eisensättigung bei unserer Maschine keine hohe ist und dabei bekanntlich Proportionalität zwischen der Erregung und den Kraftlinien besteht.

f) Berechnung der Erregermaschine.

Die mittlere Länge einer Windung auf den Magnetpolen des Generators ist:

$$l_m = 2 \cdot \left(15{,}6 + 32{,}6\right) = 96{,}4 \text{ cm} = 0{,}964 \text{ m}.$$

Jeder Pol trägt also eine Drahtlänge:

$$l = 576 \cdot 0{,}964 = 555 \text{ m}.$$

Die totale Drahtlänge auf sämtlichen Polen also:

$$L = 555 \cdot 16 = 8880 \text{ m}.$$

Damit wird dann der Widerstand der Magnetwickelung:

$$w_m = \frac{0{,}02 \cdot 8880}{5{,}14} = 32{,}6 \text{ Ohm}.$$

Um den berechneten Erregerstrom von 7,8 Amp. durch diesen Widerstand zu treiben, ist demnach eine Spannung von:

$$7{,}8 \cdot 32{,}6 = 255 \text{ Volt}$$

erforderlich.

Diese Spannung von 255 Volt hat die Erregermaschine maximal zu liefern. Ihre maximale Nutzleistung ist demnach:

$$7{,}8 \cdot 255 = \backsim 2000 \text{ Watt}.$$

Nimmt man den totalen Wirkungsgrad der Erregermaschine zu $\eta_{tot} = 0{,}75$ an, so wird der Effektverbrauch derselben:

$$\frac{2000}{0{,}75} = 2670 \text{ Watt} = \frac{2670}{763} = 3{,}64 \text{ P.S.}$$

D. i. 2,22 % der Nutzleistung des Generators bei $\cos \varphi = 0{,}8$ und 1,78 % der Nutzleistung bei $\cos \varphi = 1$.

g) Berechnung des Wirkungsgrades.

1) Die Nutzleistung der Maschine beträgt bei $\cos \varphi = 0{,}8$:

$$P = 3000 \cdot 50 \cdot 0{,}8 = \mathbf{120000} \text{ Watt}.$$

2) Schätzen wir den Verlust durch Reibung in den Lagern, Bürsten u. s. w. zu 3 % der Nutzleistung, so beträgt derselbe:

$$0{,}03 \cdot 120000 = 3600 \text{ Watt}.$$

3) Der Verlust in der Erregung (inklusive Erregermaschine) beträgt 2672 Watt.

4) Der gesamte Hysteresisverlust ist 5370 Watt.

5) Der Joule'sche Ankerverlust ist 1500 Watt.

Der gesamte Wattverlust beträgt also:

$$3600 + 2670 + 5370 + 1500 = \mathbf{13140} \text{ Watt}.$$

Der totale Wirkungsgrad des Generators wird dann:

$$\eta_{tot} = \frac{120000}{120000 + 13140} = 0{,}9 \cdot (\text{Bei } \cos \varphi = 0{,}8).$$

35. Einphasengenerator der Firma Broischi, Finzi u. Co., Mailand.

Genannte Firma lieferte für das königliche Arsenal in Venedig einen Einphasengenerator von 100 K.W. Leistung bei einem Leistungsfaktor $\cos \varphi = 1$. Die Klemmspannung ist 2000 Volt, die Stromstärke demnach 50 Amp. Die Periodenzahl beträgt 50 pro Sekunde, die

Tourenzahl 250 pro Minute. Im Nachstehenden sind die Hauptdaten der Maschine angegeben:

Anker:

Innerer Durchmesser	1709 mm
Äußerer Durchmesser	2100 „
Ankerbreite einschließlich Ventilationskanäle .	210 „
Anzahl der Nuten	24 „
Nutenform	offenes Loch
Nutendurchmesser	ca. 45 mm
Drahtzahl pro Nut	28
Gesamte Drahtzahl	672
Drahtdurchmesser unisoliert	5,4 mm

Magnetsystem:

Anzahl der Pole	24
Äußerer Durchmesser des Magnetrades . . .	1700 mm
Innerer Durchmesser der Polflächen	1300 „
Äußerer Durchmesser des Jochs	1440 „
Achsiale Länge der Pole	190 „
Breite der Schenkel am Umfang	125 „

Der Wirkungsgrad inklusive Erregermaschine beträgt 91 Proz. Die Erregermaschine besitzt acht Pole und ist fliegend angeordnet.

Wir stellen uns die Aufgabe, an der Hand der Daten die elektrischen und magnetischen Verhältnisse dieser Maschine einmal durchzurechnen. Die Maschine ist in Fig. 119 abgebildet.

Aus der Gleichung:

$$\nu = \frac{p \cdot n}{60}$$

folgt:

$$p = \frac{\nu \cdot 60}{n} = \frac{50 \cdot 60}{250} = 12.$$

Die Anzahl der Pole ist demnach gleich 24.

Der äußere Durchmesser des Polrades ist 1700 mm. Die Umfangsgeschwindigkeit beträgt also:

$$v = \frac{1700 \cdot \pi \cdot 250}{60 \cdot 1000} = 22{,}3 \text{ m/sek.}$$

Der innere Ankerdurchmesser ist 1709 mm, der äußere Ankerdurchmesser 2100 mm. Pro Pol

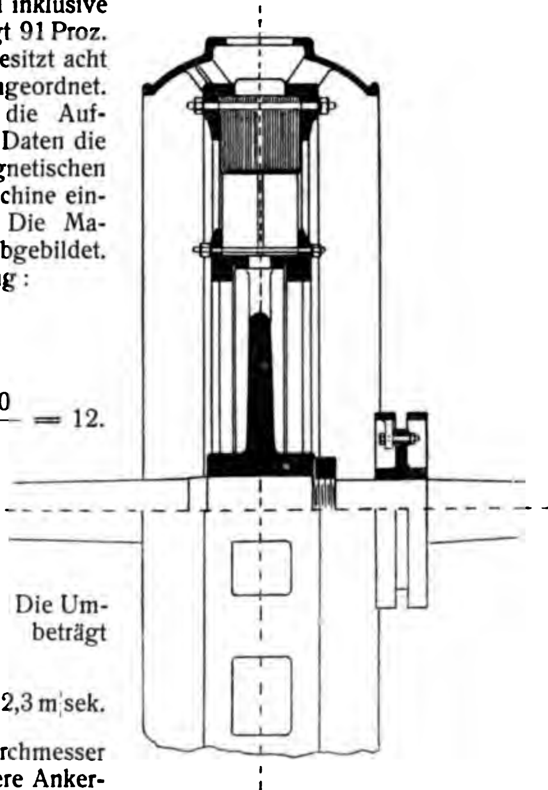


Fig. 119.

ist eine Nute angeordnet in Form eines offenen Loches von ca. 45 mm Durchmesser, sodaß der Anker im ganzen 24 Nuten enthält. Jedes Loch enthält 28 Drähte, deren Durchmesser unisoliert 5,4 mm beträgt.

Die Stromstärke der Maschine ist:

$$i = \frac{100000}{2000} = 50 \text{ Amp.}$$

Demnach die Stromdichte im Anker:

$$\frac{50 \cdot 4}{5{,}4^2 \cdot \pi} = 0{,}2 \text{ Amp./qmm.}$$

Die 28 Drähte vom isolierten Durchmesser $1{,}2 \cdot 5{,}4 = 6{,}4$ mm lassen sich in der Nut in mehreren konzentrischen Kreisen bequem unterbringen.

Die Ankerlänge b ist einschließlich eines Luftkanals zu 210 mm angegeben, sodaß für die wirksame Ankerlänge etwa 190 mm übrig bleiben.

Die Eisenhöhe des Ankers über den Zähnen beträgt etwa 140 mm. Nehmen wir für Papierisolation etwa 10 Proz. an, so wird der Ankerquerschnitt:

$$Q_a = 0{,}9 \cdot 14 \cdot 19 = 240 \text{ qcm.}$$

Schätzen wir bei induktiver Belastung mit $\cos \varphi = 0{,}8$ den Spannungsabfall der Maschine zu 20 Proz., so wird die elektromotorische Kraft:

$$E = 1{,}2 \cdot e = 1{,}2 \cdot 2000 = 2400 \text{ Volt.}$$

Die gesamte Drahtzahl z' ist:

$$z' = 28 \cdot 24 = 672.$$

Die gesamte Ankerkraftlinienzahl wird dann:

$$N = \frac{E \cdot 10^8}{2{,}22 \cdot \nu \cdot z'} = \frac{2400 \cdot 10^8}{2{,}22 \cdot 50 \cdot 672} = 3{,}22 \cdot 10^6.$$

Das bedingt eine Ankerinduktion:

$$B_a = \frac{N}{2 \cdot Q_a} = \frac{3{,}22 \cdot 10^6}{2 \cdot 240} = 6700.$$

Die gesamte Ampèrewindungszahl des Ankers ist:

$$X_a = 50 \cdot \frac{672}{2} = 16800.$$

Also pro magnetischen Kreis:

$$\frac{16800}{12} = 1400.$$

Der innere Ankerumfang ist:

$$D \cdot \pi = 170{,}9 \cdot \pi = 537 \text{ cm.}$$

Die Anzahl der Ampèrewindungen pro 1 cm Umfang wird also:

$$K = \frac{16800}{537} = 31.$$

Die Polteilung τ wird:

$$\tau = \frac{537}{24} = 22{,}35 \text{ cm} = 223{,}5 \text{ mm}.$$

Die Polbreite am Umfang ist 125 mm, sodaß:

$$\frac{\beta}{\tau} = \frac{125}{223{,}5} = 0{,}56.$$

Bei einem äußeren Ankerdurchmesser 2100 und 1400 mm Eisenhöhe des Ankers wird die Zahnhöhe:

$$\frac{2100 - 2 \cdot 140 - 1709}{2} = 55{,}5 \text{ mm}.$$

Die mittlere Breite eines Zahnes ist etwa 185 mm. Der Querschnitt des Zahnes wird dann:

$$Q_z = 18{,}5 \cdot 19 \cdot 0{,}9 = 316 \text{ qcm}.$$

Also die Zahninduktion:

$$B_z = \frac{N}{Q_z} = \frac{3{,}22 \cdot 10^6}{316} = 10200.$$

Die mittlere Länge einer Windung wird ungefähr:

$$l_m = 2 \cdot 223{,}5 + 2 \cdot 220 = 887 \text{ mm}.$$

Also die gesamte Drahtlänge bei 336 Windungen:

$$L = 0{,}887 \cdot 336 = 300 \text{ m}.$$

Demnach der Ankerwiderstand warm:

$$w_a = 0{,}02 \cdot \frac{300}{5{,}4^2 \cdot \frac{\pi}{4}} = 0{,}262 \text{ Ohm}.$$

Damit wird der Joule'sche Effektverlust im Anker:

$$i_a^2 \cdot w_a = 50^2 \cdot 0{,}262 = 656 \text{ Watt}.$$

Das Eisenvolumen des Ankerkerns ist:

$$V_a = \left(210^2 - 181{,}9^2\right) \frac{\pi}{4} \cdot 0{,}9 \cdot 19 = 148000 \text{ ccm} = 148 \text{ cdm}.$$

Also das Gewicht des Ankers:

$$G_a = 7{,}7 \cdot 148 = 1140 \text{ kg}.$$

Das Volumen der Zähne ist dagegen:

$$V_z = \left(181{,}9^2 \cdot \frac{\pi}{4} - 170{,}9^2 \cdot \frac{\pi}{4} - 24 \cdot 4{,}5^2 \frac{\pi}{4}\right) \cdot 0{,}9 \cdot 19 = 45000 \text{ ccm}.$$

Also das Gewicht:

$$G_z = 7{,}7 \cdot 45 = 346 \text{ kg}.$$

Nach der Niethammer'schen Tabelle ist die Verlustziffer bei $B = 6700$ etwa 8, bei $B = 10200$ etwa 20 Watt pro kg und 100 Perioden.

Es wird somit der Hysteresisverlust im Ankerkern:

$$P_{h1} = 8 \cdot \frac{50}{100} \cdot 1140 = 4560 \text{ Watt.}$$

Und der Verlust in den Zähnen:

$$P_{h2} = 20 \cdot \frac{50}{100} \cdot 346 = 3460 \text{ Watt.}$$

Also zusammen:

$$P_h = P_{h1} + P_{h2} = 4560 + 3460 = 8020 \text{ Watt.}$$

Wir berechnen jetzt die Temperaturerhöhung des Ankers:
Der gesamte Wattverlust beträgt:

$$P_v = 8020 + 656 = 8676 \text{ Watt.}$$

Die Ankeroberfläche ist:

$$O = 170{,}9\,\pi \cdot 10 + 210 \cdot \pi \cdot 19 + (210^2 - 170{,}9^2)\frac{\pi}{4} \cdot 2 = \underline{45900 \text{ qcm.}}$$

Dabei ist auf die Nuten keine Rücksicht genommen, was um so eher statthaft ist, als ein Teil der Wärme in den Stirnverbindungen entwickelt wird.

Nun ist: $T = 300 \cdot \frac{P_v}{O} = 300 \cdot \frac{8676}{45900} = 56^0.$

Dieser Wert wird aber praktisch nicht erreicht werden, da wir den Luftkanal gar nicht berücksichtigt haben.

Wenn wir diesen in die Rechnung einführen wollen, so haben wir 4 abkühlende Stirnflächen einzusetzen. Dann ergibt sich:

$$T = 300 \cdot \frac{8676}{70900} = 37^0.$$

Der mittlere Luftquerschnitt beträgt etwa:

$$Q_l = 20 \cdot 19 = 380 \text{ qcm.}$$

Dann wird die Luftinduktion:

$$B_l = \frac{N}{Q_l} = \frac{3{,}22 \cdot 10^6}{380} = 8500.$$

Der Luftabstand δ ist 0,9 cm.

Dann wird die magnetomotorische Kraft für den Luftraum:

$$F_l = B_l \cdot 2\delta = 8500 \cdot 1{,}8 = 15300.$$

Also die Amperewindungszahl für die Luft:

$$X_l = \frac{15300}{0{,}4\,\pi} = 12200.$$

Schätzen wir für den Eisenweg etwa 10 Proz. der Luftamperewindungen, so wird die Amperewindungszahl eines Polpaars:

$$X_m = 1{,}1 \cdot 12200 = 13400.$$

Der Wert ist ziemlich hoch.

Wir gehen nun dazu über, an Hand des Kappschen Diagramms den Spannungsabfall der Maschine zu kontrollieren:

Die hierzu erforderlichen Daten sind:

$i = 50$ Amp.

Drahtzahl pro Pol und Phase: $z'' = 28$.

$\frac{\text{Polbreite}}{\text{Polteilung}} : m = 0{,}56.$

$k_s = 1{,}0 \cdot$ (Aus Tabelle, Abschnitt 12, Seite 30).

Nun wird nach Gl. 21 die Gegenwirkung des Ankers pro Polpaar:

$$\chi_g = \frac{0{,}57}{m} \cdot z'' \cdot i \cdot \sin (m \cdot 180^0) = \frac{0{,}57}{0{,}56} \cdot 28 \cdot 50 \cdot \sin 100^0 = 1400.$$

Die statische Charakteristik der Maschine wird wegen der geringen Eisensättigung eine Gerade, sodaß sich dieselbe mit 13400 Am-

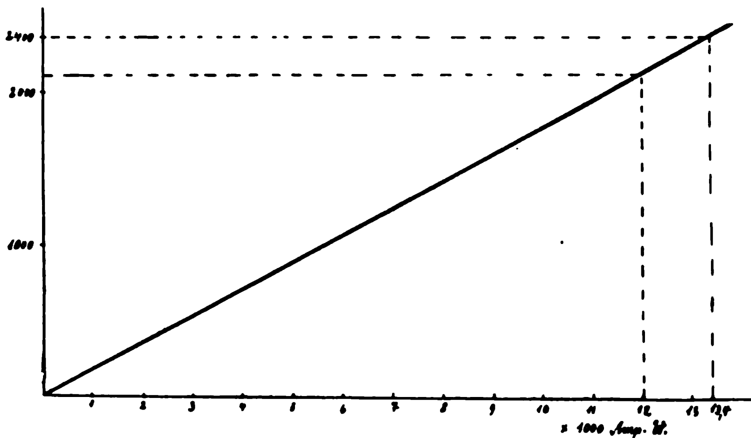


Fig. 120.

pèrewindungen pro Polpaar und zugehöriger Leerlaufsspannung von 2400 Volt zeichnen läßt, wie dies in Fig. 120 geschehen ist.

Um nun den Spannungsabfall, hervorgerufen durch die Gegenwirkung, zu bestimmen, ziehen wir die Gegenampèrewindungen 1400 von 13400 ab und erhalten bei 12000 Ampèrewindungen eine Spannung von 2150 Volt in der statischen Charakteristik, sodaß der Spannungsabfall durch Ankerrückwirkung beträgt:

$$E_g = 2400 - 2150 = 250 \text{ Volt.}$$

Die eigentliche Selbstinduktion des Ankers berechnet sich ferner aus Gl. 22.

$$E_s = \frac{k_s \cdot E \cdot z'' \cdot i}{\chi_l} = \frac{1 \cdot 2400 \cdot 28 \cdot 50}{12200} = 270 \text{ Volt.}$$

Also die Summe der Selbstinduktionen:

$$E_g + E_s = 250 + 270 = 520 \text{ Volt.}$$

Schließlich berechnet sich der Ohmsche und Wirbelstromspannungsabfall zu:

$$E_V = 2 \cdot i \cdot w_a = 2 \cdot 50 \cdot 0{,}262 = 26{,}2 \text{ Volt.}$$

Im Diagramm Fig. 121 ist als Maßstab gewählt:

72 mm = 2400 Volt.
A O = 520 „
A B = 26,2 „
O D = 2400 „

Aus der Zeichnung ergibt sich dann der Spannungsabfall bei Belastung mit $\cos \varphi = 0{,}8$ zu 370 Volt, während wir in der Rechnung für diesen Betriebszustand 400 Volt Spannungsabfall zugelassen haben. Das ist sehr günstig.

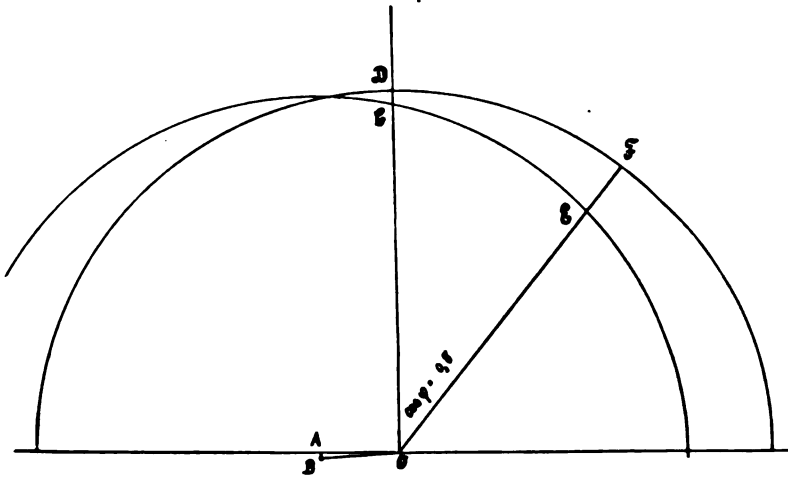


Fig. 121.

Hierzu ist aber zu bemerken, daß ein Einphasengenerator wohl niemals mit einem Leistungsfaktor 0,8 zu arbeiten gezwungen ist, da ein solcher fast ausschließlich auf Glühlampen arbeitet. Eine Maschine mit einem Spannungsabfall von 20% bei einem Leistungsfaktor 0,85 ist noch als gut zu bezeichnen.

Bei $\cos \varphi = 1$ ergibt sich der Spannungsabfall der Maschine zu [illegible] Volt.

Zum Schlusse wollen wir noch den totalen Wirkungsgrad der Maschine berechnen:

Die Nutzleistung ist: $P = 100000$ Watt.

Der Ankerverlust: $i_a^2 \cdot w_a = 656$ Watt.

Der Hysteresisverlust: $P_h = 8020$ Watt.

Der Reibungsverlust werde geschätzt zu 3% der Nutzleistung.

Dann wird:

$$P_r = \frac{3}{100} \cdot 100000 = 3000 \text{ Watt.}$$

Der Verlust in der Erregung sei 2% der Nutzleistung, also gleich 2000 Watt.

Somit ergibt sich:

$$\eta = \frac{100000}{100000 + 656 + 8020 + 3000 + 2000} = 0{,}88.$$

Wie unter den Daten angegeben, beträgt der Wirkungsgrad in Wirklichkeit 91%. Die Werte stimmen gut überein. Bei der ausgeführten Maschine sind die Verluste für Reibung und Erregung zweifellos geringer als die von uns hoch geschätzten Werte.

36. Berechnung eines Drehstromgenerators.

Es ist ein Drehstromgenerator für 2000 Volt Klemmspannung und 20 Amp. Phasenstrom zu berechnen. Die Periodenzahl sei 50 pro Sekunde.

Lösung:

Die Maschine besitzt bei $\cos\varphi = 1$ eine Nutzleistung von:

$$P = \sqrt{3} \cdot e \cdot i = \sqrt{3} \cdot 2000 \cdot 20 = 69200 \text{ Watt.}$$

Die Tourenzahl der Maschine sei $n = 300$ pro Minute. Das liefert eine Polzahl:

$$\nu = \frac{p \cdot n}{60};$$

$$p = \frac{\nu \cdot 60}{n} = \frac{50 \cdot 60}{300} = 10.$$

Die Maschine erhält also 20 Pole.

Wählen wir eine Umfangsgeschwindigkeit von 26 m/sek. so gilt:

$$v = \frac{D_m \cdot \pi \cdot n}{60 \cdot 100}.$$

Daraus ergibt sich der Durchmesser des rotierenden Magnetsystems zu:

$$D_m = \frac{v \cdot 60 \cdot 100}{\pi \cdot n} = \frac{26 \cdot 60 \cdot 100}{\pi \cdot 300} = 166 \text{ cm.}$$

Nimmt man den Luftraum $\delta = 0{,}6$ cm an, so wird der innere Ankerdurchmesser:

$$D_a = D_m + 2 \cdot \delta = 166 + 1{,}2 = 167{,}2 \text{ cm.}$$

Wählt man ferner die Ampèrewindungszahl pro cm Umfang $K = 42$, so wird die Gesamtampèrewindungszahl des Ankers:

$$X_a = D_a \cdot \pi \cdot K = 167{,}2\, \pi \cdot 42 = \underline{22000}.$$

Nun gilt für Drehstrommaschinen nach Gl. 70:

$$X_a = 1{,}5 \cdot \sqrt{2} \cdot \xi'_a \cdot i'.$$

Somit wird die Windungszahl pro Phase:

$$\xi'_a = \frac{X_a}{1{,}5 \cdot \sqrt{2} \cdot i'} = \frac{22000}{1{,}5 \cdot \sqrt{2} \cdot 20} = 520.$$

Da sich diese Windungszahl auf 20 Pole verteilt, so erhalten wir eine Windungszahl pro Pol und Phase:

$$\frac{520}{20} = 26.$$

Die Drahtzahl pro Phase ist demnach:

$$z' = 520 \cdot 2 = 1040.$$

Nehmen wir einen Spannungsabfall zwischen Leerlauf und Vollbelastung von 15% der Klemmspannung an, so wird die Leerlaufsspannung:

$$E = 1{,}15 \cdot 2000 = 2300 \text{ Volt.}$$

Die Schaltung des Ankers soll in Sternschaltung ausgeführt werden. Dann ist die elektromotorische Kraft einer Phase:

$$E' = \frac{E}{\sqrt{3}} = \frac{2300}{\sqrt{3}} = 1330 \text{ Volt.}$$

Aus der Gleichung:

$$E' = 2{,}22 \cdot N \cdot \nu \cdot z' \cdot 10^{-8}$$

ergibt sich nun die den Anker durchsetzende Kraftlinienzahl:

$$N = \frac{E' \cdot 10^8}{2{,}22 \cdot \nu \cdot z'} = \frac{1330 \cdot 10^8}{2{,}22 \cdot 50 \cdot 1040} = 1{,}17 \cdot 10^6.$$

Wählen wir nun die Induktion in den Zähnen $B_z = 10000$, so wird der Zahnquerschnitt:

$$Q_z = \frac{1{,}17 \cdot 10^6}{10000} = 117 \text{ qcm.}$$

Ferner ergibt sich die Polteilung unserer Maschine aus der Formel:

$$\tau = \frac{Dm \cdot \pi}{2p} = \frac{166 \cdot \pi}{20} = 26{,}05 \text{ cm.}$$

Wir haben nunmehr die Nutendimensionen zu berechnen. Die Nutenzahl kann gewählt werden: 6p, 12p, 18p usw. Nehmen wir zwei Löcher pro Pol und Phase, so ergibt sich eine gesamte Nutenzahl von:

$$2 \cdot 3 \cdot 20 = 120 \text{ Nuten.}$$

Nun ist der Ankerumfang:

$$167{,}2 \cdot \pi = 526 \text{ cm.}$$

Damit wird die Nutteilung (Entfernung von Mitte Nut bis Mitte Nut):

$$\frac{526}{120} = 4{,}38 \text{ cm} = 43{,}8 \text{ mm.}$$

Bei einer Stromstärke von 20 Amp. und einer Stromdichte von 2 Amp. pro qmm wird der Querschnitt des Ankerdrahtes 7 qmm, wozu ein Durchmesser des blanken Drahtes von 3 mm gehört. Der besponnene Draht erhält dann einen Durchmesser von:

$$d' = 1{,}2 \cdot 3 = 3{,}6 \text{ mm.}$$

Die Drahtzahl pro Phase ist 1040, die Lochzahl pro Phase $\frac{120}{3}$ $= 40$. In eine Nut kommen demnach $\frac{1040}{40} = 26$ Drähte. Diese 26 Drähte lassen sich in einen Querschnitt 18×20 wickeln. Rechnen wir 1 mm Isolation, so wird die Nutenbreite:

$$18 + 2 \cdot 1 = 20 \text{ mm.}$$

Die Höhe der Nut wird, wenn ein Holzbrettchen von 2 mm Stärke zum Nutenschluß verwendet wird:

$$20 + 1 + 2 = 23 \text{ mm.}$$

Unter der Nut bleibt ein dünner Steg von 1 mm Stärke stehen. Die Öffnung der Nut sei etwa 5 mm. Siehe Fig. 122. Zeichnet man die Nuten und die Pole auf, so entfallen auf einen Pol 3 Zähne von der Breite 23,8 mm, durch welche je $\frac{N}{3}$ Kraftlinien hindurchgehen. Der oben berechnete Zahnquerschnitt $Q_z = 117$ läßt sich also darstellen durch:

$$Q_z = 117 = 3 \cdot 2{,}38 \cdot b \cdot 0{,}9,$$

wenn b die Ankerbreite und 0,9 der Faktor für die Papierisolation ist. Also die Ankerbreite:

$$b = \frac{117}{2 \cdot 2{,}38 \cdot 0{,}9} = 18{,}2 \text{ cm.}$$

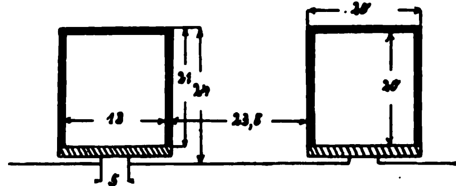


Fig. 122.

Wählen wir nun die Induktion im Ankerkern $B_a = 6000$, so wird der Ankerquerschnitt:

$$Q_a = \frac{N}{2 \cdot B_a} = \frac{1{,}17 \cdot 10^6}{2 \cdot 6000} = 97{,}5 \text{ qcm.}$$

Die Eisenhöhe des Ankers ist dann gegeben durch die Beziehung:

$$Q_a = 97{,}5 = 0{,}9 \cdot 18{,}2 \cdot h.$$

$$h = \frac{97{,}5}{0{,}9 \cdot 18{,}2} = 6 \text{ cm.}$$

Der äußere Durchmesser des Ankers wird somit:

$$D = 167{,}2 + 2 \cdot 8{,}4 = 184 \text{ cm.}$$

Die mittlere Länge einer Windung bei Dreiphasenankern läßt sich nicht genau berechnen, da die sich überkreuzenden Phasen an der Kreuzungsstelle soweit gekröpft werden müssen, daß sie sich nicht berühren. Man kann die mittlere Länge einer Windung angenähert aus der Formel berechnen:

$$l_m = 2 \cdot (b + \alpha' \cdot a).$$

Darin ist b die Ankerlänge, a die Entfernung von Mitte Nut bis Mitte Nut, in welche gewickelt wird und α' eine Größe, die bei Drehstrom etwa 1,6, bei Hochspannung bis zu 2,0 gewählt wird.

In unserem Falle ist b = 18,2 cm, a = 26,05 cm und $\alpha' = 1{,}6$. Demnach:

$$l_m = 2 \cdot (18{,}2 + 26{,}05 \cdot 1{,}6) = 120 \text{ cm} = 1{,}2 \text{ m}.$$

Die Windungszahl pro Phase ist 520, also die Wickellänge einer Phase:

$$L' = 1{,}2 \cdot 520 = 624 \text{ m}.$$

Der Widerstand einer Phase ist dann:

$$w' = \frac{c \cdot L'}{q} = \frac{0{,}02 \cdot 624}{7} = \underline{1{,}78} \text{ Ohm}.$$

Dann tritt bei 20 Amp. in jeder Phase ein Joulescher Effektverlust P' auf:

$$P' = i^2 \cdot w' = 20^2 . 1{,}78 = 670 \text{ Watt}.$$

Also in den 3 Phasen zusammen:

$$3 \cdot 670 = \underline{2010} \text{ Watt}.$$

Nunmehr sind die Hysteresisverluste zu berechnen.

Das Eisenvolumen der Zähne beträgt:

$$V_z = 0{,}9 \cdot 18{,}2 \cdot \left[172^2 \frac{\pi}{4} - 167{,}2^2 \frac{\pi}{4} - 120 \cdot 2 \cdot 2{,}4 \right] = \underline{10200} \text{ ccm}.$$

Das Gewicht der Zähne ist also:

$$G_z = 7{,}7 \cdot 10{,}2 = 78{,}6 \text{ kg}.$$

Der mittlere Hysteresisverlust pro kg und 100 Perioden beträgt nach unseren Tabellen bei $B_z = 10000$ etwa 13 Watt. Dann ist der Hysteresisverlust in den Zähnen:

$$P_{h_1} = \frac{13 \cdot 78{,}6 \cdot 50}{100} = 511 \text{ Watt}.$$

Das Volumen des Ankerkerns ist:

$$V_a = (184^2 - 172^2) \frac{\pi}{4} \cdot 0{,}9 \cdot 18{,}2 \cdot = 54000 \text{ ccm}.$$

Also das Gewicht:

$$G_a = 7{,}7 \cdot 54 = 416 \text{ kg}.$$

Bei $B_a = 6000$ ist die mittlere Verlustziffer etwa 6. Also:

$$P_{h_2} = \frac{6 \cdot 416 \cdot 50}{100} = 1248 \text{ Watt}.$$

Das ergibt dann einen gesamten Hysteresisverlust:

$$P_h = P_{h_1} + P_{h_2} = 511 + 1248 = 1759 = \backsim 1760 \text{ Watt}.$$

Es würde nun die Temperaturerhöhung im Anker zu berechnen sein nach der Formel:

$$T = 300 \cdot \frac{P_v}{O}.$$

Nun ist: $P_v = 1398 + 1760 = 3158$ Watt.

Ferner ist die abkühlende Ankeroberfläche:

$$O = 184\,\pi \cdot 18{,}2 + 167{,}2\,\pi \cdot 18{,}2 + 2 \cdot \left(184^2 - 172^2\right) \frac{\pi}{4}$$

$$= 10500 \quad + \quad 9580 \quad + \quad 6600 \quad = \underline{26680} \text{ qcm}.$$

Also: $$T = \frac{300 \cdot 3152}{26680} = 35{,}6^{0}\,C.$$

Dimensionierung der Magnete.

Die Breite des Polbogens ist nach Figur 123) 130 mm. Dieser steht eine Zahnbreite $3 \cdot 23{,}8 = 71{,}4$ mm gegenüber. Der mittlere Luftquerschnitt wird demnach:

$$Q_l = \frac{13{,}0 + 7{,}14}{2} \cdot 18{,}1 = 195 \text{ qcm}.$$

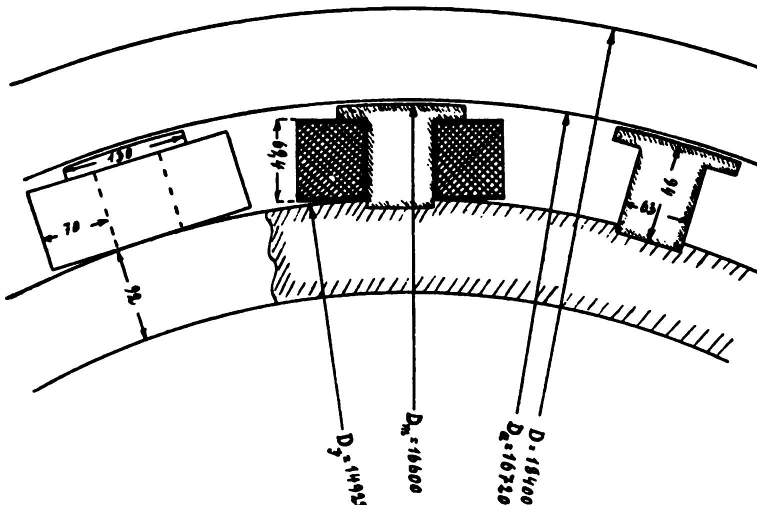


Fig. 123.

Die Luftinduktion beträgt somit:

$$B_l = \frac{1{,}17 \cdot 10^6}{195} = 6000.$$

Der Luftabstand δ ist gewählt zu 0,6 cm. Die magnetomotorische Kraft für die Luft ist also:

$$F_l = B_l \cdot l_l = 6000 \cdot 2 \cdot 0{,}6 = 7200.$$

Also die zugehörige Ampèrewindungszahl:

$$X_l = \frac{F_l}{0{,}4\,\pi} = \frac{7200}{0{,}4\,\pi} = 5740.$$

Geben wir für das Eisen einen Zuschlag von 10 Proz., so wird die gesamte, auf einem Polpaar aufzubringende Ampèrewindungszahl:

$$X_m = 1{,}1 \cdot X_l = 1{,}1 \cdot 5740 = 6320.$$

Die Ampèrewindungszahl des Ankers ist nach obigem:

$$X_a = 22000.$$

Also pro magnetischen Kreis: $\frac{22000}{10} = 2200.$

Der Quotient aus Feld- und Ankerampèrewindungen ist somit:

$$\frac{6320}{2200} = 2,87.$$

Nehmen wir nun die Stärke des Magnetstromes etwa zu 6 Amp. an, so wird die Windungszahl:

$$\xi = \frac{6320}{6} = 1054.$$

Also pro Pol:

$$\frac{1054}{2} = 527.$$

Die Stromdichte in der Magnetwickelung sei 1,5 Amp./qmm. Dies bedingt einen Drahtquerschnitt:

$$q = \frac{6}{1,5} = 4 \text{ qmm}.$$

Hierzu der Durchmesser: $d = 2,25$ mm.

Isoliert: $d' = 1,2 \cdot 2,25 = 2,7$ mm.

Somit hat ein Schenkel 527 Windungen à 2,7 mm zu tragen.

Wir berechnen nun zunächst die Dimensionen des Pols unter Zugrundelegung eines angenommenen Streuungskoeffizienten von 1,2. Ein Pol führt dann eine Kraftlinienzahl:

$$N_p = 1,2 \cdot N = 1,2 \cdot 1,17 \cdot 10^6 = 1,405 \cdot 10^6.$$

Wählen wir die Polinduktion für Gußstahl $B_p = 16000$, so erhält der Pol einen Querschnitt:

$$Q_p = \frac{N_p}{B_p} = \frac{1,405 \cdot 10^6}{16000} = 88 \text{ qcm}.$$

Wählen wir die Länge des Pols in achsialer Richtung 14 cm, so wird die Breite:

$$\frac{88}{14} = 6,3 \text{ cm}.$$

Wir zerlegen nun die 527 Windungen in die beiden Faktoren 22 und 24, sodaß wir 528 Windungen pro Pol erhalten, und legen nebeneinander 24, übereinander 22 Windungen. Dann wird die Wickelungshöhe:

$$22 \cdot 2,7 = 59,4 \text{ mm}.$$

Die Breite der Wickelung wird:

$$24 \cdot 2,7 = 65 \text{ mm}.$$

Lassen wir nun in dem gußeisernen Joch eine Induktion von $5500 = B_J$ zu, so wird der erforderliche Querschnitt desselben:

$$Q_J = \frac{N_p}{2 \cdot B_J} = \frac{1,405 \cdot 10^6}{2 \cdot 5500} = \underline{128 \text{ qcm}}.$$

Die achsiale Länge des Jochs sei 14 cm. Dann wird die radiale Tiefe desselben:

$$\frac{128}{14} = 9{,}2 \text{ cm.}$$

Damit sind die Hauptmaße der Maschine bestimmt. In Fig. 123 ist ein Teil der Anordnung herausgezeichnet.

Berechnung des Streuungskoeffizienten.

Im Anschlusse hieran möge der Streufaktor σ genau berechnet werden. Die Kraftlinienzahl N_1 wird:

$$N_1 = 0{,}4\,\pi\,\xi \cdot i\,\frac{b \cdot h}{a}.$$

Darin ist:

$$b = 14 \text{ cm.}$$
$$h = 6{,}94 \text{ cm.}$$
$$a = 19{,}75 \text{ cm.}$$
$$\xi \cdot i = 1056 \cdot 6 = 6336.$$

Also:

$$N_1 = 0{,}4\,\pi \cdot 6336 \cdot \frac{14 \cdot 6{,}94}{19{,}75} = \underline{39000.}$$

Für N_2 gilt:

$$N_2 = 2 \cdot 0{,}92 \cdot \xi \cdot i \cdot h \cdot \log\left(\frac{a + \pi \cdot c}{a}\right).$$

Darin ist: $c = 6{,}3$ cm.

Somit:

$$N_2 = 2 \cdot 0{,}92 \cdot 6336 \cdot 6{,}94 \cdot \log\left(\frac{19{,}75 + \pi \cdot 6{,}3}{19{,}75}\right) = 24300.$$

Schließlich wird:

$$N_3 = 0{,}92 \cdot \xi \cdot i \cdot b \cdot \log\left(\frac{a + \pi \cdot c}{a}\right)$$

$$= 0{,}92 \cdot 6336 \cdot 14 \cdot \log\left(\frac{19{,}75 + \pi \cdot 6{,}3}{19{,}75}\right) = 24500.$$

Der gesamte Streufluß beträgt demnach:

$$N_s = N_1 + N_2 + N_3 = 39000 + 24300 + 24500 = \underline{87800.}$$

Wir schlagen zu dem berechneten Wert 20 Proz. zu und erhalten:

$$N_s = 1{,}2 \cdot 87800 = \underline{105500.}$$

Die in einem magnetischen Kreise zu erzeugende Kraftlinienzahl wird nun: $1{,}17 \cdot 10^6 + 0{,}1055 \cdot 10^6 = 1{,}2755 \cdot 10^6$.

Damit ergibt sich bei unserer Maschine ein Streuungskoeffizient:

$$\sigma = \frac{1{,}2755 \cdot 10^6}{1{,}17 \cdot 10^6} = \underline{1{,}09.}$$

Genaue Berechnung der Ampèrewindungen.

Die einzelnen Kraftlinienlängen sind:

Luft: $l_l = 2 \cdot 0{,}6 = 1{,}2$ cm.
Pole: $l_p = 2 \cdot 7{,}94 = 15{,}88$ cm.
Joch: $l_J = 26{,}05 + 9{,}2 = 35{,}25$ cm.

Der Anker kann bei der gewählten niedrigen Induktion vernachlässigt werden.

Bei $N_p = 1{,}2755 \cdot 10^6$ Kraftlinien wird nun die Induktion in den Polkernen:

$$B_p = \frac{1{,}2755 \cdot 10^6}{88} = 14500.$$

Im Joch:

$$B_J = \frac{1{,}2755 \cdot 10^6}{2 \cdot 128} = 5000.$$

Aus den Magnetisierungskurven ergibt sich zu:

$B_p = 14500$	$H_p = 14$ (Stahlguß).
$B_J = 5000$	$H_J = 10{,}5$ (Gußeisen).
$B_l = 6000$	$H_l = 6000.$

Es berechnet sich also die magnetomotorische Kraft des ganzen magnetischen Kreises zu:

$$F_l = 6000 \cdot 1{,}2 + 14 \cdot 15{,}88 + 10{,}5 \cdot 35{,}25 = 7200 + 222 + 370 = 7892.$$

Die Feldampèrewindungszahl wird somit:

$$X_m = \frac{7892}{0{,}4\,\pi} = 6300.$$

Der früher berechnete Wert betrug 6336. Bei 1056 Windungen pro Polpaar wird der genaue Magnetstrom:

$$i_m = \frac{6300}{1056} = 5{,}96 \text{ Amp.}$$

Berechnung und Konstruktion der Charakteristik.

In Fig. 124 sind nach den in der Tabelle berechneten Werten die statische, sowie die dynamische Charakteristik aufgezeichnet und zwar letztere einmal für $\cos \varphi = 1$ und $\cos \varphi = 0{,}8$. Auf der rechten Ordinate sind die den einzelnen Kraftlinienzahlen entsprechenden Phasenspannungen aufgetragen, die sich folgendermaßen berechnen:

$$E' = 2{,}22 \cdot N \cdot \nu \cdot z' \cdot 10^{-8} = 2{,}22 \cdot N \cdot 50 \cdot 1040 \cdot 10^{-8} = 1155 \cdot N \cdot 10^{-6}$$

So ergibt sich:

$N = 1{,}17 \cdot 10^6$	$E' = 1330$
$N = 1 \cdot 10^6$	$E' = 1155$
$N = 0{,}75 \cdot 10^6$	$E' = 876$
$N = 0{,}5 \cdot 10^6$	$E' = 578$
$N = 0{,}25 \cdot 10^6$	$E' = 289.$

Die zu den einzelnen Phasenspannungen gehörenden Netzspannungen sind:

$E' = 1330$	$E = \sqrt{3} \cdot E' = 2300$
$E' = 1155$	$E = 2000$
$E' = 876$	$E = 1515$
$E' = 578$	$E = 1000$
$E' = 289$	$E = 500.$

Tabelle zur Konstruktion der Charakteristik.

N	$B_l = H_l = \frac{N}{Q_l}$	$B_J = 1{,}09 \cdot \frac{N}{Q_p}$	$B_p = 1{,}09 \frac{N}{2\,QJ}$	H_p	H_J	$0{,}8\,H_l\,l_l$	$0{,}8\,H_p \cdot l_p$	$0{,}8\,H_J \cdot l_J$	χ_m $\Sigma 0{,}8\,H \cdot l$	$i_m = \frac{\chi_m}{\xi_m}$
$0{,}25 \cdot 10^6$	1285	3100	1065	2,5	—	1230	31,8	—	1262	1,2
$0{,}5 \cdot 10^6$	2570	6200	2130	3,8	—	2460	48,3	—	2510	2,38
$0{,}75 \cdot 10^6$	3855	9300	3195	5	5	3690	63,5	145	3440	3,12
$1 \cdot 10^6$	5140	12400	4260	7	6	4920	89	169	5178	4,9
$1{,}17 \cdot 10^6$	6000	14500	5000	14	10,5	5740	178	296	6214	5,94

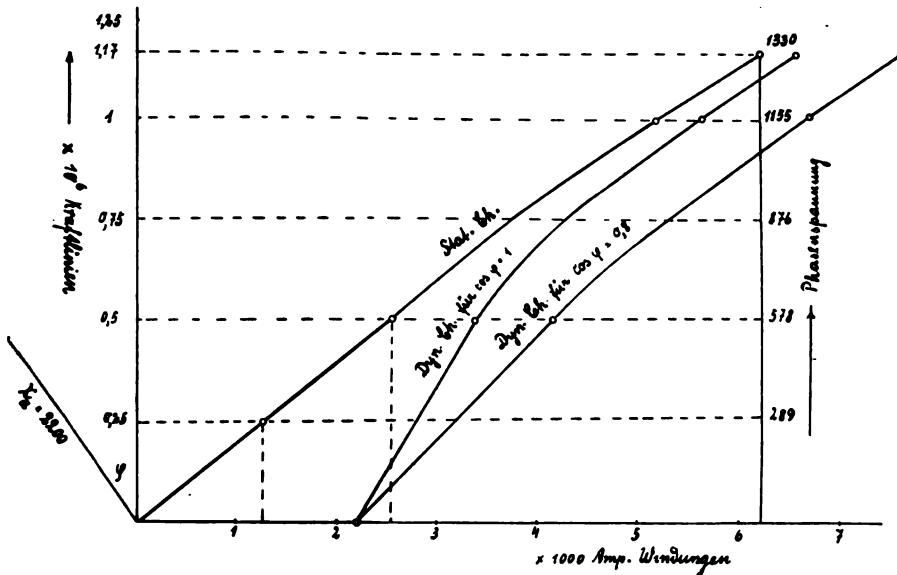


Fig. 124.

Aus der dynamischen Charakteristik für cos φ = 1 erhalten wir bei 6214 Ampèrewindungen Erregung eine Klemmspannung von 2220 Volt. Die Leerlaufsspannung ist 2300 Volt, also der Spannungsabfall zwischen Leerlauf und induktionsloser Vollbelastung:

$$2300 - 2220 = 80 \text{ Volt.}$$

Das sind 3,6% der Klemmspannung.

Bei induktiver Belastung und cos φ = 0,8 ergibt sich zu der Erregung 6214 eine Klemmspannung von 1885 Volt, also ist der Spannungsabfall:

$$2300 - 1885 = 415 \text{ Volt.}$$

Das macht in Prozenten der Klemmspannung:

$$x = \frac{415 \quad 100}{1885} = 22\%.$$

Erregermaschine.

Die Länge einer mittleren Windung auf den Magnetpolen des Generators ist:

$$2 \cdot (13,3 + 21) = 68,6 \text{ cm} = 0,686 \text{ m}.$$

Die Drahtlänge eines Pols ist somit:

$$l = 528 \cdot 0,686 = 362 \text{ m}.$$

Die gesamte Drahtlänge auf allen Polen also:

$$L = 362 \cdot 20 = 7240 \text{ m}.$$

Der Widerstand derselben ist:

$$w_m = \frac{0,02 \cdot 7240}{4} = 36,2 \text{ Ohm}.$$

Aus den Charakteristiken ergibt sich nun, daß wir zur Erzeugung einer Spannung von 2000 Volt bei Leerlauf etwa 5170 Ampèrewindungen Erregung nötig haben, was einem Magnetstrome von 4,9 Amp. entspricht. Bei Belastung mit $\cos \varphi = 1$ dagegen sind 5650 Ampèrewindungen oder ein Strom von 5,34 Amp. erforderlich. Die Spannung der Erregermaschine muß demnach bei Leerlauf:

$$4,9 \cdot 36,2 = 178 \text{ Volt}$$

und bei Belastung mit $\cos \varphi = 1$:

$$5,34 \cdot 36,2 = 194 \text{ Volt}$$

betragen. Die Differenz von 194 — 178 = 16 Volt muß im Regulierwiderstand verzehrt werden bei einem Strome von 4,9 Amp., sodaß derselbe eine Größe von:

$$\frac{16}{4,9} = 3,3 \text{ Ohm}$$

erhält.

Die Leistung der Erregermaschine wird nun:

$$194 \cdot 5,34 = 1040 \text{ Watt} = 1,04 \text{ K. W.}$$

Nehmen wir den totalen Wirkungsgrad zu 0,75 an, so wird der Effektverbrauch der Erregermaschine:

$$\frac{1,04}{0,75} = 1,4 \text{ K. W.} = \frac{1400}{736} = 1,9 \text{ P. S.}$$

D. i. 2,2% der Nutzleistung bei $\cos \varphi = 1$.

Berechnung des Wirkungsgrades.

1. Die Nutzleistung der Maschine bei $\cos \varphi = 1$ ist: 69200 Watt.
2. Der Reibungsverlust sei 3% der Nuztleistung, also: $0,03 \cdot 69200 = 2076$ Watt.
3. Der Verlust in der Erregung ist: 1400 Watt.
4. Der gesamte Hysteresisverlust beträgt: 1760 Watt.
5. Der Joulesche Ankerverlust ist: 2010 Watt.

Der Gesamtverlust beträgt: 7246 Watt.

Somit besitzt der Drehstromgenerator einen totalen Wirkungsgrad:

$$\eta_{tot} = \frac{69200}{69200 + 7246} = 0,88.$$

37. Drehstromgenerator der Vereinigten Elektrizitätsgesellschaft, Wien.

Auf der Pariser Ausstellung 1900 war die auf Tafel I dieses Buches abgebildete Drehstrommaschine von der Vereinigten Elektrizitätsgesellschaft, Wien ausgestellt. Dieselbe war direkt gekuppelt mit einer von der Maschinenfabrik Märky, Bromowsky und Schulz, Königgrätz gelieferten Kondensations-Kompounddampfmaschine.

Wie die Tafel zeigt, ist das Ankergehäuse horizontal geteilt. Die an das Gehäuse zu beiden Seiten angegossenen Füße ruhen auf Justierplatten. Die Justierplatte ist durch Fundamentbolzen verankert. Jeder Fuß trägt an beiden Seiten einen mit Muttern versehenen Stehbolzen, der in einer Pfanne aufruht, sodaß durch Drehen dieser Bolzen die genaue horizontale Einstellung ermöglicht wird. Zur Unterstützung des Gehäuses ist in der Mitte der Fundamentgrube noch ein dritter Fuß untergesetzt. Die horizontale Verschiebung wird durch in Muttern gelagerte Schraubenbolzen bewerkstelligt.

Das einteilige Magnetrad trägt 50 Pole von rundem Querschnitt mit angegossenen Polschuhen. Die Pole sind auf dem Jochring angeschraubt und werden von innen angezogen.

Die Leistung der Maschine beträgt 250 K. W. bei einer Spannung von 220 Volt und einer Stromstärke von 660 Amp. Die Periodenzahl ist 46 pro Sekunde. Die Tourenzahl 110 pro Minute.

Die übrigen Hauptdaten der Maschine sind:

Äußerer Durchmesser des Ankerkerns:	3920 mm.
Innerer „ „ „	3600 „
(In der Zeichnung ist irrtümlich 3640 angegeben).	
Ankerbreite	150 mm
Nutenzahl	300
Nutendimensionen	18 · 24
Anzahl der Stäbe pro Nut	1
Stabquerschnitt	16 · 19
Ankerwiderstand pro Phase	0,00366
Zahninduktion	11000
Ankerinduktion	3600
Luftabstand	10 mm
Durchmesser des Magnetkranzes	3580 „
Länge des Polbogens	150 „
Dicke der Polschuhe	20 „
Durchmesser der Schenkel	110 „
Schenkellänge	205 „
Drahtquerschnitt	3,5 37
Windungszahl pro Pol	42
Widerstand der Magnetwickelung	0,148

Die Erregerwickelung ist hochkant gewickelt. Der Wirkungsgrad der Maschine beträgt, die Erregermaschine einbegriffen, 94%.

38. 350 Kilowatt Drehstromgenerator der Deutschen Elektrizitätswerke Garbe, Lahmeyer & Co., Aachen.

Die auf Tafel III abgebildete Drehstrommaschine ist von den Deutschen Elektrizitätswerken zu Aachen, einer Firma, welche sich durch ihre tüch-

tigen Leistungen auf dem Gebiete des Dynamobaues auszeichnet, für eine Leistung von 350 Kilovoltampère bei einer Spannung von 550 Volt gebaut. Die Tourenzahl der Maschine ist 125 pro Minute, die Periodenzahl 50 pro Sekunde.

Die Maschine ist eine Innenpol-Schwungradmaschine. Das feststehende Gußeisengehäuse trägt den aus einzelnen Blechsegmenten zusammengesetzten Anker. Die in den Nuten des Ankers liegende Drehstromwickelung ist eine umlaufende Stabwickelung mit 2 Stäben pro Pol und Phase. Als Nutenform ist ein geschlossenes Loch gewählt. Das rotierende Magnetrad ist als Schwungrad ausgebildet, d. h. das erforderliche Schwungewicht ist in dem gußeisernen Kranz des Rades untergebracht. Auf den Kranz sind die massiven, schmiedeeisernen, mit Polschuhen versehenen Polkerne mittels Schraubenbolzen festgeschraubt.

Wir stellen uns nun die Aufgabe, die Maschine an Hand der aus der Zeichnung zu entnehmenden Daten durchzurechnen:

Aus der Nutzleistung:

$$P = \sqrt{3} \cdot e \cdot i \cdot \cos \varphi = 350000$$

ergibt sich die Stromstärke:

$$i = \frac{350000}{\sqrt{3} \cdot e \cdot \cos \varphi}.$$

Bei induktiver Vollbelastung arbeitet die Maschine nach den Angaben der Firma mit einem Leistungsfaktor 0,7.

Also:

$$i = \frac{350000}{\sqrt{3} \cdot 550 \cdot 0{,}7} = 526 \text{ Amp.}$$

Bei Sternschaltung der Ankerwickelung ist der Phasenstrom gleich dem äußeren Strom = 526 Amp., dagegen beträgt die Stern- oder Phasenspannung:

$$e' = \frac{e}{\sqrt{3}} = \frac{550}{\sqrt{3}} = 318 \text{ Volt.}$$

Bei 125 Touren und 50 Perioden ergibt sich ferner:

$$\nu = \frac{p \cdot n}{60}.$$

$$p = \frac{\nu \cdot 60}{n} = \frac{50 \cdot 60}{125} = 24.$$

Das Magnetrad erhält also 48 Pole.

Aus der Zeichnung entnehmen wir den äußeren Durchmesser des Magnetrades. Derselbe ist 3600 mm = D_m.

Dann ist die Umfangsgeschwindigkeit des Rades:

$$v = \frac{D_m \cdot \pi \cdot n}{60 \cdot 100} = \frac{360 \cdot \pi \cdot 125}{60 \cdot 100} = 23{,}5 \text{ m/sek} \cdot (D_m \text{ in cm!})$$

Der innere Ankerdurchmesser beträgt nach der Zeichnung:

$$D_a = 3614 \text{ mm.}$$

Also der einfache Luftabstand:

$$\delta = \frac{3614 - 3600}{2} = 7 \text{ mm} = 0{,}7 \text{ cm.}$$

Die Ampèrewindungszahl des Ankers ist gegeben durch die Beziehung:

$$\chi_a = 1{,}5 \cdot \sqrt{2} \cdot \xi'_a \cdot i'.$$

Da der Anker 2 Stäbe pro Pol und Phase enthält, so ist die Drahtzahl pro Phase:

$$2 \cdot 48 = 96.$$

Also die Windungszahl pro Phase:

$$\xi'_a = \frac{96}{2} = 48.$$

Die Ampèrewindungszahl des Ankers ist also:

$$\chi_a = 1{,}5 \cdot \sqrt{2} \cdot 48 \cdot 526 = 53\,700.$$

Lassen wir einen Spannungsabfall zwischen Leerlauf und induktiver Vollbelastung von 20% im Anker zu, so wird die elektromotorische Kraft bei Leerlauf:

$$E = 1{,}2 \cdot e = 1{,}2 \cdot 550 = 660 \text{ Volt}.$$

Somit die elektromotorische Kraft pro Phase:

$$E' = \frac{E}{\sqrt{3}} = \frac{660}{\sqrt{3}} = 382 \text{ Volt}.$$

Die diese elektromotorische Kraft induzierende Ankerkraftlinienzahl wird nun:

$$N = \frac{E' \cdot 10^8}{k \cdot \nu \cdot z'} = \frac{382 \cdot 10^8}{2{,}3 \cdot 50 \cdot 96} = 3{,}46 \cdot 10^6.$$

Der Faktor $k = 2{,}3$ ergibt sich aus Tabelle III, Kap. I, 6. bei einem Verhältnis $\frac{\beta}{\tau} = \frac{2}{3}$ (aus Zeichnung).

Die Polteilung der Maschine berechnet sich zu:

$$\tau = \frac{D_m \cdot \pi}{2p} = \frac{360 \cdot \pi}{48} = 23{,}55 \text{ cm}.$$

Die Entfernung von Mitte Nut bis Mitte Nut beträgt:

$$\frac{D_a \cdot \pi}{6 \cdot 48} = \frac{361{,}4 \cdot \pi}{288} = 3{,}86 \text{ cm}.$$

(Nutenzahl $= 2 \cdot 3 \cdot 1p = 6 \cdot 48 = 288$).

Der Lochdurchmesser ist 16 mm. Nehmen wir den blanken, kreisförmigen Stab 14 mm stark, wobei der Rest für Isolation bleibt, so wird die Stromdichte im Anker:

$$\frac{526}{\frac{14^2 \cdot \pi}{4}} = 3{,}4 \text{ Amp./qmm}.$$

Wie die Zeichnung erkennen läßt, kommen auf einen Pol 4 Zähne. Die Breite eines Zahnes an der stärksten Stelle ist 3,86 cm, an der schwächsten 3,86 — 1,4 = 2,46 cm, also ist die mittlere Breite eines Zahnes:

$$\frac{3{,}86 + 2{,}46}{2} = \frac{6{,}32}{2} = 3{,}16 \text{ cm}.$$

Die Breite der 4 auf einen Pol entfallenden Zähne ist dann:

$$4 \cdot 3{,}16 = 12{,}64 \text{ cm.}$$

Die gesamte Ankerbreite ist 270 mm.

Der Anker enthält einen Luftkanal von 14 mm Breite, sodaß als wirksame Ankerlänge einzusetzen ist:

$$b = 270 - 14 = 256 \text{ mm.}$$

Der Querschnitt der vor einem Pol liegenden Zähne ist somit:

$$Q_z = 25{,}6 \cdot 12{,}64 \cdot 0{,}9 = 292 \text{ qcm.}$$

(0,9 ist wegen der Papierisolation einzuführen).

Damit erhalten wir in den Zähnen eine Induktion:

$$B_z = \frac{N}{Q_z} = \frac{3{,}46 \cdot 10^6}{292} = 11\,800.$$

Die Höhe des Ankereisens ist 18 cm.

Der Ankerquerschnitt wird also:

$$Q_a = 0{,}9 \cdot 18 \cdot 25{,}6 = 415 \text{ qcm.}$$

Also die Ankerinduktion:

$$B_a = \frac{N}{2 \cdot Q_a} = \frac{3{,}46 \cdot 10^6}{2 \cdot 415} = 4180.$$

Berechnung der Verluste im Anker.

Um die Jouleschen Effektverluste in den 3 Phasen zu berechnen, brauchen wir den Widerstand einer Phase.

Nun ist die mittlere Länge einer Windung ungefähr:

$$l_m = 2 \cdot (b + a' \cdot a).$$

Hierin ist a die Entfernung zwischen den beiden zu bewickelnden Nuten. In unserem Falle (siehe die Zeichnung) umfaßt eine Windung 5, die andere 3 Nutabstände, sodaß wir mit einer mittleren Nutentfernung gleich 4 Nutteilungen rechnen können.

Dann ist:

$$a = 4 \cdot 3.86 = 15.44 \text{ cm.}$$

a' wird zu 1.6 angenommen.

Dann wird:

$$l_m = 2 \cdot (25{,}6 + 1{,}6 \cdot 15.44) = 100 \text{ cm.}$$

Da die Windungszahl einer Phase 48 ist, so wird die Wickelungslänge pro Phase:

$$L' = 48 \cdot 100 = 4800 \text{ cm} = 48 \text{ m.}$$

Also der Ohmsche Widerstand einer Phase:

$$w' = \frac{c \cdot L'}{q} = \frac{0{,}02 \cdot 48}{\frac{14^2 \pi}{4}} = 0{,}00624 \text{ Ohm.}$$

Somit der Joulesche Effektverlust in einer Phase:

$$i^2 \cdot w' = 526^2 \cdot 0{,}00624 = 1720 \text{ Watt.}$$

In allen 3 Phasen:

$$3 \cdot 1720 = 5160 \text{ Watt.}$$

Nun folgt die Berechnung der Hysteresisverluste:

Das Eisenvolumen der Zähne beträgt:

$$V_z = 0{,}9 \cdot 25{,}6 \left[364{,}6^2 \frac{\pi}{4} - 361{,}4^2 \frac{\pi}{4} - 1{,}6^2 \frac{\pi}{4} \cdot 288 \right]$$

$$= 35\,800 \text{ cm} = 35{,}8 \text{ cdm.}$$

Somit das Eisengewicht der Zähne:

$$G_z = 7{,}7 \cdot 35{,}8 = 276 \text{ kg.}$$

Das Eisenvolumen des Ankers wird:

$$V_a = \left(400{,}6^2 - 364{,}6^2\right)\frac{\pi}{4} \cdot 25{,}6 \cdot 0{,}9 = 500000 \text{ ccm} = 500 \text{ cdm.}$$

Damit ergibt sich das Eisengewicht des Ankers zu:

$$G_a = 7{,}7 \cdot 500 = 3850 \text{ kg.}$$

Bei einer Zahninduktion von 11800 beträgt die Verlustziffer nach unseren Tabellen im Mittel etwa 20 Watt pro kg und 100 Perioden

Wir erhalten also einen Hysteresisverlust in den Zähnen:

$$P_{h_1} = 20 \cdot 276 \cdot \frac{50}{100} = 2760 \text{ Watt.}$$

Für eine Ankerinduktion 4180 ist die Verlustziffer etwa 3, also der Hysteresisverlust im Anker:

$$P_{h_2} = 3 \cdot 3850 \cdot \frac{50}{100} = 5800 \text{ Watt.}$$

Gesamter Hysteresisverlust:

$$P_h = 2760 + 5800 = 8560 \text{ Watt.}$$

Kontrollieren wir nun auch die im Anker auftretende Übertemperatur, so ist zunächst der gesamte Effektverlust:

$$P_v = 8560 + 5160 = 13\,720 \text{ Watt.}$$

Ferner die abkühlende Oberfläche:

O = äußere Mantelfläche + innere Mantelfläche + 2 mal Stirnfläche =

$$400{,}6\,\pi \cdot 25{,}6 + 361{,}4 \cdot \pi \cdot 25{,}6 + 2 \cdot (400{,}6^2 - 361{,}4^2)\frac{\pi}{4}$$

$$= 33000 \quad + 29000 \quad + 47000 = 109\,000 \text{ qcm.}$$

Nun berechnet sich die Übertemperatur zu:

$$T = 300 \cdot \frac{P_v}{O} = 300 \cdot \frac{13\,720}{109\,000} = 37{,}8^0 \text{ C.}$$

Berechnung der Magnete.

Die Breite der vier vor einem Pol liegenden Zähne beträgt nach früherem 12,64 cm.

Die Breite des Polbogens ergibt sich aus der Zeichnung zu 16,5 cm.

Der mittlere Luftquerschnitt wird also:

$$Q_l = \frac{12{,}64 + 16{,}5}{2} \cdot 25{,}6 = 14{,}57 \cdot 25{,}6 = 373 \text{ qcm.}$$

Erhöhen wir den Wert wegen der hier auftretenden nützlichen Streuung noch um 15%, so wird:

$$Q_l = 1{,}15 \cdot 373 = 430 \text{ qcm.}$$

Damit erhalten wir eine Induktion in der Luft:

$$B_l = \frac{N}{Q_l} = \frac{3{,}46 \cdot 10^6}{430} = 8000.$$

Die magnetomotorische Kraft für den Luftraum wird dadurch:

$$F_l = B_l \cdot 2 \cdot \delta = 8000 \cdot 2 \cdot 0{,}7 = 11200$$

Also die Ampèrewindungszahl für die Luft:

$$\chi_l = \frac{11200}{0{,}4\,\pi} = 11200 \cdot 0{,}8 = 8900.$$

Um die gesamten Ampèrewindungen für den ganzen magnetischen Kreis zu erhalten, schlagen wir für den Eisenweg 10% zu, sodaß:

$$\chi_m = 1{,}1 \cdot \chi_l = 1{,}1 \cdot 8900 = 9800.$$

Das ist die Ampèrewindungszahl eines Polpaares. Jeder Pol trägt die Hälfte, also:

$$\chi_m \text{ pro Pol} = \frac{9800}{2} = 4900.$$

Der Erregerstrom der Maschine ist nach den Angaben 70 Amp., also wäre die Windungszahl eines Pols:

$$\xi_m = \frac{\chi_m}{i_m} = \frac{4900}{70} = 70.$$

Nach der Beschreibung ist jeder Pol der Maschine mit 72 Windungen versehen, sodaß die wirklich ausgeführte Feldampèrewindungszahl beträgt:

$$\chi_m = 70 \cdot 72 = 5040 \text{ pro Pol.}$$

Also pro Polpaar:

$$\chi_m = 5040 \cdot 2 = 10080.$$

Wir haben oben die gesamte Ampèrewindungszahl des Ankers berechnet zu 53700.

Pro magnetischen Kreis erhalten wir also:

$$\chi_a = \frac{53700}{24} = 2250.$$

Das Verhältnis: Feldampèrewindungen zu Ankerampèrewindungen ergibt sich also in diesem Falle zu:

$$\frac{10080}{2250} = 4{,}48.$$

Der innere Umfang des Ankers ist:

$$361{,}4 \cdot \pi = 1135 \text{ cm.}$$

Die Anzahl Ampèrewindungen pro 1 cm Umfang ist also bei dieser Maschine:

$$K = \frac{53700}{1135} = 47{,}2$$

Der Durchmesser des Magnetdrahtes ist unisoliert 8 mm. Die Stromdichte in der Magnetwickelung beträgt dabei:

$$\frac{70}{\frac{8^2 \pi}{4}} = 1{,}4 \text{ Amp./qmm.}$$

Der isolierte Drahtdurchmesser wird:

$$d' = 1{,}2 \cdot 8 = 9{,}6 \text{ mm.}$$

Da 4 Drahtlagen übereinander gewickelt sind, so wird die Wickelungshöhe:

$$4 \cdot 9{,}6 = 38{,}4 \text{ mm.}$$

Nun ist die Breite des Poles 11 cm, seine achsiale Länge gleich 24 cm. Das ergibt einen Polquerschnitt:

$$Q_p = 11 \cdot 24 = 264 \text{ qcm}$$

Nehmen wir den Streuungsfaktor vorläufig zu 1,2 an, so ist die Kraftlinienzahl eines Poles:

$$N_m = 1{,}2 \cdot 3{,}46 \cdot 10^6 = 4{,}15 \cdot 10^6 .$$

Dadurch erhalten wir die Polinduktion:

$$B_p = \frac{4{,}15 \cdot 10^6}{264} = 15700.$$

Die radiale Dimension des gußeisernen Jochringes ist 13 cm, die achsiale Länge desselben 24 cm. Also der Querschnitt desselben:

$$Q_J = 13 \cdot 24 = 312 \text{ qcm.}$$

Die Induktion im Joch beträgt dann:

$$B_J = \frac{4{,}15 \cdot 10^6}{2 \cdot 312} = 6660.$$

Untersuchung des Spannungsabfalles.

Wir wollen nun nach der in den Abschnitten 12 und 13 gegebenen Kappschen Methode den Spannungsabfall unserer Maschine bei Belastung feststellen.

Nun ist:

Der Ankerstrom: $i = 526$ Amp.
Die Drahtzahl pro Pol und Phase: $z'' = 2$.
$\frac{\text{Polbreite}}{\text{Polteilung}} : m = \frac{2}{3}$.
Der Faktor $k_s = 0{,}76$ (aus Tabelle).

Für Dreiphasenmaschinen berechnen sich die Gegenampèrewindungen des Ankers pro Polpaar aus der Formel:

$$X_g = \frac{1{,}68}{m} \cdot z'' \cdot i \cdot \sin (m \cdot 180^0)$$

$$X_g = \frac{1{,}68}{2/3} \cdot 2 \cdot 526 \cdot \sin 60^0 = 2320.$$

Zeichnen wir nun die statische Charakteristik, die wir als Gerade betrachten können, mit Hilfe der Koordinaten 10080 (Abszisse) und

660 Volt (Ordinate) und ziehen von 10080 den Wert $X_g = 2320$ ab, so erhalten wir den durch die Ankerrückwirkung verursachten Spannungsabfall zu 150 Volt (Fig. 125).

Also pro Phase: $E_g = \frac{150}{\sqrt{3}} = 87$ Volt.

Die Selbstinduktion des Ankers pro Phase berechnet sich zu:

$$E_s = k_s \cdot \frac{E' \cdot z'' \cdot i}{X_l} = \frac{0{,}76 \cdot 382 \cdot 2 \cdot 256}{8900} = 34{,}3 \text{ Volt.}$$

Ferner berechnen wir den Ohmschen Spannungsverlust in einer Phase:

$$i \cdot w' = 526 \cdot 0{,}00624 = 3{,}28 \text{ Volt}$$

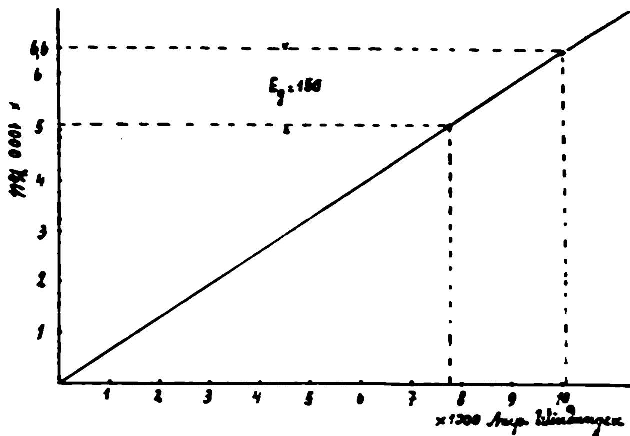


Fig. 125.

und addieren hierzu für den durch Wirbelströme entstehenden Spannungsabfall den gleichen Betrag zu, sodaß:

$$E_v = 2 \cdot 3{,}28 = 6{,}56 \text{ Volt}$$

wird.

Die Summe der induktiven Spannungen beträgt nun:

$$E_g + E_s = 87 + 34{,}3 = \sim 122 \text{ Volt.}$$

Machen wir nun in Fig. 126 OA = 122 Volt und AB = 6,56 Volt und beschreiben mit der Phasenspannung von 382 Volt einen Kreis um O und um B, so ergibt sich für $\cos \varphi = 0{,}7$ ein Spannungsabfall EF = 92 Volt pro Phase, sodaß der gesamte Spannungsabfall für diesen Betriebszustand beträgt:

$$92 \cdot \sqrt{3} = 158 \text{ Volt.}$$

das sind 22 Proz. der Leerlaufsspannung.

Der Wert ist gegen den der Berechnung zugrunde gelegten um 2 Proz. zu hoch; es dürfte aber der Wert von 20 Proz. bestehen bleiben, da wir die Charakteristik einfach als Gerade gezeichnet haben. Würden

wir die Charakteristik genau ermitteln, so würde sich der Wert Eg wahrscheinlich etwas kleiner als der von uns angegebene ergeben.

Bei induktionsfreier Belastung ergibt sich aus dem Diagramm der Spannungsabfall CD = 25 Volt.

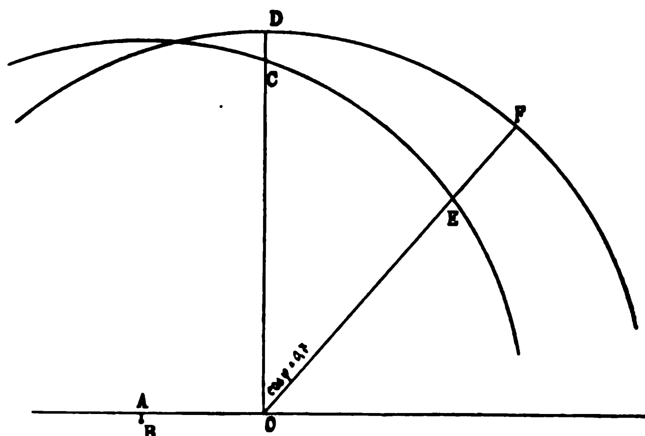


Fig. 126.

Berechnung des Wirkungsgrades.

Stellen wir die einzelnen Verluste zwecks Berechnung des Wirkungsgrades zusammen, so erhalten wir:

1. Der Joulesche Effektverlust des Ankers ist: . .	5160 Watt.
2. Der Hysteresisverlust des Ankers und der Zähne ist	8560 „
3. Der Reibungsverlust werde geschätzt zu 1 Proz. der Leistung: $\frac{1}{100} \cdot 350000 =$	3500 „
4. Der Effekt der Erregermaschine ist bei einer Erregerspannung von 110 Volt und 70 Amp. und einem totalen Wirkungsgrad 0,85 geschätzt: $\frac{110 \cdot 70}{0,85}$.	9000 „
5. Die Nutzleistung des Generators ist:	350000 „
Der Gesamtverlust ergibt sich zu:	26220 Watt.

Also der totale Wirkungsgrad der Maschine:

$$\eta = \frac{350000}{350000 + 26220} = 0,93$$

Nach den Angaben der Firma besitzt die Maschine einen totalen Wirkungsgrad von 94 Prozent.

Auf Tafel II des Buches ist die Buchse mit den Schleifringen zu dieser Maschine aufgezeichnet. Die Bürstenzapfen werden von einem

feststehenden gußeisernen Bock getragen. Man verwendet der sicheren Stromzuführung halber stets mehr als zwei, gewöhnlich 4 oder 6 Bürstenzapfen. Die Bürsten sind gewöhnlich aus Kohle hergestellt.

Tafel IV zeigt einen ebenfalls von den „Deutschen Elektrizitätswerken" zu Aachen herrührenden Drehstromgenerator. Die Ausführung ist aus der Zeichnung ohne weiteres zu verstehen.

Druckfehlerverzeichnis.

Auf Seite 4, Zeile 2 von unten muß es heißen:

$$\text{Die Schnittzahl} = 2p \cdot N \cdot z' \cdot \frac{n}{60}.$$

Seite 8, Zeile 13 von oben, Gleichung 10:

$$E_{max} \cdot \sin\left[(\omega\ t) + \frac{\pi}{2}\right] = E_{max} \cdot \sin\left[2\pi \cdot \nu \cdot t + \frac{\pi}{2}\right]$$

Seite 25, Zeile 9 von unten:

$$L = \frac{4\pi \cdot \xi^2 \cdot u \cdot Q}{l} \cdot 10^{-9}.$$

Seite 25, Zeile 8 von unten:
Selbstinduktionskoeffizient.

Seite 27, Zeile 4 von unten: Maschine statt Maschinen.
„ „ „ 3 „ „ zu statt zur.
„ „ „ 1 „ „ $E_S = E - e$.

Druck von J. B. Hirschfeld in Leipzig.


THE NEW YORK
PUBLIC LIBRARY
ASTOR, LENOX AND

